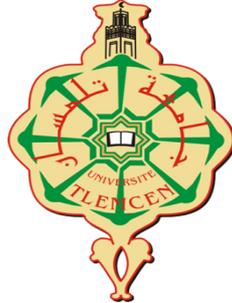


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen
Faculté de Technologie



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : « Automatique »
Option : « Automatique et informatique industrielle »
Préparé au Département de Génie Électrique et Électronique

et présenté par

HASSAINE Zakaria et ZEGHOUDI Soufiane

Intitulé du mémoire

Commande latérale d'un véhicule électrique

Mémoire dirigée par Dr.BENARIBA Hassan

soutenu le 29 Septembre 2020 devant la commission d'examen composée de :

Mr Boumédiène Abdelmadjid	Professeur	Univ.Tlemcen	Président
Mr Yacoubi Boumédiène	Maître assistant class A	Univ.Tlemcen	Examineur

Année universitaire 2019 - 2020

Dédicace

Nous dédions ce travail à :

- Nos très chers parents
- Nos frères et Soeurs
- Nos familles
- Nos amis

HASSAINE Zakaria et ZEGHOUDI Soufiane
Tlemcen, le 29 Septembre 2020

Remerciement

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à ALLAH Azza Wa Jal pour nous avoir donné le souffle de vie, la force, la santé et l'intelligence nécessaires pour accomplir ce travail.

Nous tenons sincèrement à remercier les personnes qui grâce à eux, nous n'aurions pas pu être là, nos parents. Qui nous ont encouragés tout au long de ces cinq années, Ainsi que toute ma famille.

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Ce projet est le résultat de cinq mois de travail, et de recherche sous la supervision du notre encadrante Mr BENARIBA Hassan, que nous remercions profondément pour ses instructions et qui nous a aidé à progresser dans notre réflexion grâce à ses conseils, son esprit critique et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire..... Ainsi que pour nous avoir motivé pour travailler et poursuivre le projet.

Nous voudrions aussi remercier également les membres du jury Messieurs Boumédiène Abdelmadjid et Yacoubi Boumédiène qui nous rendent honneur en acceptant d'examiner notre modeste travail. Leurs présences, l'intérêt qu'ils portent à notre projet, les conseils et remarques qu'ils nous auront apportés ne pourront que enrichir ce travail.

Nous remercions aussi à tous nos collègues de l'option Automatique et Informatique Industriel.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à la Modélisation et commande linéaire et non linéaire de la dynamique latérale du véhicule électrique.

Une première étape consiste à modéliser le véhicule électrique. Un modèle dynamique du véhicule un modèle à trois degrés de liberté sera présenté qui tient en compte des déplacements longitudinal et latéral.

La seconde étape discute la commande linéaire par un régulateur PI de la dynamique latérale du VE. Aussi, une synthèse de commande non linéaire par mode glissant sera présentée et appliquée. Les résultats obtenus pour le contrôle latéral confirment que la commande par mode glissant est robuste et assure une très bonne poursuite de trajectoire en présence des variations paramétriques et des perturbations extérieurs.

Mots clés : Véhicule Électrique (VE), Modélisation, PI, Mode glissant, contrôle latéral.

Abstract

The work presented in this thesis is devoted to the Modeling and linear and non-linear control of the lateral dynamics of the electric vehicle.

A first step consists to model the electric vehicle. A dynamic model of the vehicle with three degrees of freedom will be presented which takes into account the longitudinal and lateral displacements.

The second step discusses the linear control by a PI regulator of the lateral dynamics of the VE. Also, a nonlinear control synthesis by sliding mode will be presented and applied. The results obtained for the lateral control confirm that the sliding mode control is robust and ensures very good trajectory following in the presence of parametric variations and external disturbances.

Keywords : Electric Vehicle (EV), Modelling, IP, Sliding Mode, Lateral Control.

ملخص

العمل المقدم في هذه المذكرة مكرس للنمذجة والتحكم الخطي وغير الخطي للديناميكية الجانبية للسيارة الكهربائية.

الخطوة الأولى هي نمذجة السيارة الكهربائية. سيتم تقديم نموذج ديناميكي للسيارة بثلاث درجات من الحرية يأخذ في الاعتبار الإزاحة الطولية والجانبية.

تتناقش الخطوة الثانية التحكم الخطي بواسطة منظم PI للديناميكية الجانبية للسيارة الكهربائية. أيضا، سيتم عرض وتطبيق التحكم غير الخطي عن طريق وضع الانزلاق.

تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها للتحكم الجانبي أن التحكم عن طريق وضع الانزلاق قوي ويضمن اتباع مسار جيد جدا في وجود تغيرات واضطرابات بارمترية.

الكلمات المفتاحية: السيارة الكهربائية (VE)، النمذجة، منظم PI، وضع الانزلاق، التحكم الجانبي.

Abréviation

VE	Véhicule Electrique.
GM	General Motors.
DC	Courant Continu.
AC	Courant alternatif.
VHP	Véhicule Hybride Parallèle.
STI	Système de Transport intellegents.
FEM	Force Electro-Motrice.
Ni-cd	Nichel-Cadium.
Ni-mh	Nichel Hydrure Métalique.
VEH	Véhicule Electrique Hybride.
KERS	Flybrid Kinetic Energy Recouvry Systems.
ESP	Electronic Stability Program.
VR	Véhicule Route.
PI	Proportionnel Integral.
P	Proportionnel.
PID	Proportionnel Integral Dérivateur.
BF	Boucle Fermée.
BO	Boucle Ouverte.
VSS	Système à Structure Variable.
MG	Mode glissant.

Notation

$C_G X$	Axe Longitudinal.
$C_G Y$	Axe Transversal.
$C_G Z$	Axe Orthogonal.
C_G	Centre de gravité.
θ	Angle de tangage.
ϕ	Angle de roulis.
ψ	Angle de lacet.
V_x	Vitesse longitudinale du véhicule.
V_y	Vitesse latérale du véhicule.
F_f^y	forces de contact pneumatique-chaussée appliquée à l'essieu avant.
F_r^y	forces de contact pneumatique-chaussée appliquée à l'essieu arrière.
α	Angle de dérive.
l_f	Distance du centre de gravité à l'essieu avant.
l_r	Distance du centre de gravité à l'essieu arrière.
m	Masse totale de véhicule.
J_z	Moment d'inertie de lacet du véhicule.
μ	Adhérence.
C_{f0}	Coefficient de raideur des pneus avant pour $\mu=1$.
C_{r0}	Coefficient de raideur des pneus arrière pour $\mu=1$.
C_f	Coefficient de raideur des pneus avant.
C_r	Coefficient de raideur des pneus arrière.
η_t	Largeur de contact pneu-sol.
K_m	Gain de direction manuelle.
R_s	Rapport de réduction de la direction.
B_s	Coefficient d'amortissement de la colonne de la direction.
I_s	Moment d'inertie du volant.
l_s	Distance de visée.
r	Vitesse de lacet.
Ψ_L	Angle de cap relatif .
y_L	L'écart latéral du véhicule par rapport au centre de voie.
δ_f	Angle de braquage des roues avant.
δ_d	Angle au volant.
ρ_{ref}	Courbure de la route.
Γ_d	Couple conducteur.
Γ_a	Couple d'assistance.
Γ_s	Couple d'auto-alignement.
Ψ_L	Angle de cap relatif .
S^d	Valeur de consigne de la variable d'état.
$e(X)$	écart de la variable à réguler.
λ	une constante positive qui interprète la bande passante de contrôle désirée.

r degré relatif.
 $V(x)$ Fonction de Lyapunov.

Table des matières

I GÉNÉRALITÉS SUR LE VÉHICULE ÉLECTRIQUE	4
I.1 Introduction	5
I.2 Généralité et classification d'un VE	5
I.2.1 Définition	5
I.2.2 Historique	6
I.2.3 Architecture du véhicule électrique	10
I.2.4 Fonctionnement d'un véhicule électrique	11
I.2.5 Classification des véhicules électriques	11
I.3 Les organes pour le contrôle longitudinal	13
I.4 Les organes pour le contrôle latérale	15
I.5 Les organes pour le contrôle verticale	17
I.6 Les systèmes de transport intelligents STI	18
I.7 Les systèmes de sécurité	18
I.7.1 protection contre les chocs électriques	18
I.7.2 La sécurité de la batterie	19
I.7.3 Risque électrique	19
I.7.4 La sécurité des opérations de chargement des batteries	19
I.8 Stratégie de la gestion d'énergie et source d'énergie électrique	19
I.8.1 Les batteries	19
I.8.2 Les super condensateurs	22
I.8.3 Les volants d'inertie	23
I.9 Le chargeur	24
I.9.1 Principe de fonctionnement du chargeur	24
I.10 Avantages et inconvénient des VE	26
I.11 Conclusion	26
II MODÉLISATION ET COMMANDE LINÉAIRE DE LA DYNAMIQUE LATÉRALE DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE	27
II.1 Introduction	28
II.2 Modélisation du VE(modèle latérale)	29
II.2.1 Positionnement du véhicule sur la voie	33
II.2.2 Système de direction assistée électrique	34
II.2.3 Modèle véhicule-route (VR)	35
II.3 Système de commande de l'accélération latérale	36
II.4 Essais en boucle ouverte	37

II.5	Synthèse de la commande latérale	41
II.5.1	Synthèse d'un régulateur PI pour la commande latérale du véhicule	41
II.5.2	Détermination des paramètres du régulateur PI	41
II.5.3	La méthode de Ziegler-Nichols	42
II.6	Résultat de simulation	44
II.7	Conclusion	52

III COMMANDE NON LINÉAIRE PAR MODE GLISSANT DE LA DYNAMIQUE LATÉRALE DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE **53**

III.1	Introduction	54
III.2	Commande par mode glissant	54
III.2.1	Systèmes à structure variable	55
III.3	Théorie des modes glissants	55
III.3.1	Objectif de la commande par mode glissant	57
III.3.2	Principe de la commande par mode glissant	57
III.4	Conception de la commande par mode glissant	57
III.4.1	Choix de la surface de glissement	57
III.4.2	Condition de convergence	59
III.4.3	Détermination de la loi de commande	60
III.5	Élimination du phénomène du broutement (Chattering)	62
III.6	Synthèse de la commande latérale par mode glissant	64
III.7	Résultat de simulation	67
III.8	Conclusion	75

Table des figures

I.1	Système de propulsion d'un VE	6
I.2	Une des premières voitures électrique(Thomas Parker 1884)	7
I.3	La Jamais Contente 1899	7
I.4	La voiture électrique EV1(GM 1996)	8
I.5	La Prius (TOYOTA 1997)	8
I.6	Le Tesla Roadster I	9
I.7	Honda e	10
I.8	Schéma synoptique d'une chaîne de traction[30]	10
I.9	Principe de fonctionnement d'un véhicule électrique	11
I.10	Principe de l'architecteur série	12
I.11	Principe de l'architecteur parallèle[19]	13
I.12	Principe de l'architecteur hybride combiné, type Prius	13
I.13	Les organes constitutifs du mode longitudinal	14
I.14	Synoptique d'un Système de Propulsion	14
I.15	Les organes de la dynamique latérale du véhicule	16
I.16	Schéma d'une suspension	17
I.17	Le système de suspension avant en transparence	18
I.18	La vue interne d'une batterie	20
I.19	Batterie au plomb de hawker l'armasafe	20
I.20	Batterie au nickel-cadmium (Ni-Cd) de saft type MRX	21
I.21	La batterie Ni-Mh de la Toyota Prius	21
I.22	Les batteries au lithium polymère de Nissan	21
I.23	Exemple de supercondensateurs et leur modules	22
I.24	(a) volant d'inertie du tramway Citadis[Alstom,2007], (b) volant d'inertie 100% mécanique de Jaguar	24
I.25	Chargeur d'un VE	24
I.26	Synoptique des étapes de conversion d'un chargeur	25
II.1	Schéma descriptif du véhicule et de ses sous-ensembles	28
II.2	Les différents mouvements de véhicule	29
II.3	Mouvement du véhicule dans le système d'axe (X,Y)	30
II.4	Angles de glissement dans un modèle de bicyclette[7]	32
II.5	Positionnement du véhicule sur la voie	33
II.6	Modèle de la colonne de direction	34
II.7	Modèle véhicule-route (VR)	36
II.8	Le cas d'un mouvement circulaire	38

II.9	Le cas d'un mouvement en deux virages	40
II.10	Regulateur PI	41
II.11	Essai de Ziegler-Nichols en boucle ouverte	42
II.12	Caractérisation de la réponse indicielle dans la méthode Ziegler-Nichols en BO	42
II.13	Caractérisation de la réponse indicielle dans la méthode Ziegler-Nichols en BF.	43
II.14	Test de suivi de trajectoire	45
II.15	Test de robustesse à une vitesse élevée	46
II.16	Test de robustesse par rapport au changement de rayon de courbure	47
II.17	Incertitude sur le coefficient de rigidité du pneu	49
II.18	Incertitudes sur la masse totale du véhicule	50
II.19	Test en présence d'une perturbation extérieure	51
III.1	Convergence du système glissant	56
III.2	Glissement idéal	56
III.3	Glissement réel	57
III.4	Linéarisation exacte de l'écart	59
III.5	Représentation de la commande équivalente	61
III.6	La fonction 'sign'	62
III.7	Phénomène de Chattering dans un plan bidimensionnel	63
III.8	Fonction SAT avec un seuil et deux seuils (zone morte).	63
III.9	Fonction de classe C1 ($\epsilon > 0$ et petit)	64
III.10	Test de suivi de trajectoire	68
III.11	Test de robustesse à une vitesse élevée	69
III.12	Test de robustesse par rapport au changement de rayon de courbure	70
III.13	Incertitude sur le coefficient de rigidité du pneu	72
III.14	Incertitudes sur la masse totale du véhicule	73
III.15	Test en présence d'une perturbation extérieure	74

Liste des tableaux

I.1	Les batteries au lithium polymère de Nissan	22
I.2	Donnée constructeur de divers supercondensateurs	23
I.3	Exemples des volants d'inertie	23
II.1	Relations de réglage préconisé par la méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte [11]	43
II.2	Paramètres des correcteurs à partir de la méthode de pompage et de la BF pour la méthode de Ziegler Nichols [11]	43

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le véhicule électrique n'est pas une idée nouvelle. Du XIXème à la fin du XXème siècle, divers modèles ont été expérimentés et ont tenté de rivaliser avec les véhicules thermiques. L'échec a été à chaque fois au rendez-vous, en raison du manque de capacité des batteries et donc de la faible autonomie de ces véhicules, comparés à celle des véhicules thermiques. Cela a prouvé que la polyvalence et l'autonomie étaient au centre des enjeux du développement du véhicules.

Le développement des projets en matière de véhicule électrique peut s'expliquer tout d'abord par les objectifs environnementaux fixés dans les cadres mondiaux pour lutter contre le changement climatique, visant notamment à diminuer les émissions de CO₂. Par ailleurs, l'industrie automobile de cette époque est en crise mondial et a besoin d'être renouvelée. La voiture électrique apparaît alors comme un levier de relance et de modernisation. Enfin, la maturité technologique de la batterie Lithium-ion ouvre des perspectives pour le développement à grande échelle du véhicule électrique. Jusqu'à présent, le frein essentiel au développement du véhicule électrique était la batterie dont la capacité était insuffisante.[5]

L'objectif étant d'élaborer des stratégies d'assistance au contrôle latéral de véhicule routier léger, il est indispensable de modéliser le véhicule. Depuis quelques années, la modélisation des véhicules routiers pour le contrôle automatique et plus généralement pour le contrôle global de châssis est la préoccupation des chercheurs. Le véhicule est un système mécanique complexe dans la mesure où il possède des caractéristiques non linéaires introduites notamment par des organes de liaison tels que des ressorts et amortisseurs. De plus, il est l'objet de nombreuses variations de paramètres tels que la masse, la vitesse et l'adhérence par exemple. Le contrôle dynamique de châssis peut être envisagé selon plusieurs axes. Son principe reste toutefois fondé sur l'analyse des forces qui s'exercent aux pieds des roues selon les directions longitudinale, transversale et verticale. Des stratégies de contrôles individuelles ou combinées de ces trois modes peuvent donc être mises en œuvre.

Dans le cadre du suivi de trajectoire et pour plus de simplicité, ces recherches ont finalement abouti à aborder la modélisation selon deux domaines : un mode latéral qui tient compte des mouvements transversaux du véhicule sur la chaussée et un mode longitudinal gérant la dynamique du véhicule relative au régime moteur (accélération et freinage).

Notre travail c'est une premier partie autour une véhicule sans l'actionneur électrique, s'organise de trois chapitres principaux :

Le premier chapitre est consacré à l'étude et à la présentation des véhicules électriques ainsi que leurs évolutions à travers l'histoire, également nous nous penchons sur la classification et constitution des organes de traction, de sécurité et d'assistance.

Dans le deuxième chapitre traite de la modélisation et commande linéaire de la dynamique latérale du véhicule électrique.

Le troisième chapitre présente commande non linéaire par mode glissant de la dynamique latérale du véhicule électrique, qui est un fonctionnement particulier des systèmes à structure variable.

Finalement, nous terminons par une conclusion générale sur l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre I

GÉNÉRALITÉS SUR LE VÉHICULE ÉLECTRIQUE

I.1 Introduction

La voiture électrique a été souvent considérée comme une technologie pleine d'avenir et qui donne des espérances pour mettre fin à cette pollution alarmante de l'atmosphère due au secteur de transport routier, capable de prendre une importante part de marché, mais qui n'y est pas arrivée. Cet échec s'explique principalement par la concurrence, disposant d'une technologie bien établie : le moteur à explosion, qui a profité des économies d'échelle, du faible coût du carburant et des subsides.

Conçues pour lutter efficacement contre la pollution, les véhicules électriques sont, malheureusement, freinés par leurs coûts élevés, leur autonomie limitée qui dépend de la capacité des batteries, le manque d'investissements et d'autres problèmes critiques qui handicapent cette invention.

L'idée du véhicule électrique n'est pas récente et pourtant sa structure interne n'est pas figée. Plusieurs solutions sont actuellement en développement. La recherche dans le domaine des batteries est importante et donne lieu à de nombreux prototypes.

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter un bref historique, quelques généralités sur les véhicules électriques, et d'étudier son fonctionnement ainsi ses différentes architectures et les éléments constituant[40].

I.2 Généralité et classification d'un VE

I.2.1 Définition

Un véhicule est un ensemble de corps reliés entre eux par plusieurs liaisons visant d'une part à assurer le mouvement du châssis mais aussi le confort des passagers qu'il transporte. Il est composé d'un châssis, et d'un système de liaison au sol comprenant : les pneumatiques, les roues, les trains et les suspensions. La dynamique du système de direction n'est pas pris en compte et l'angle au volant est directement appliqué aux roues.[26]

Un véhicule électrique VE est un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Contrairement aux véhicules à carburant, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue.[7]

1. Batteries
2. Moteur
3. Transmission
4. Freins
5. Régulateur

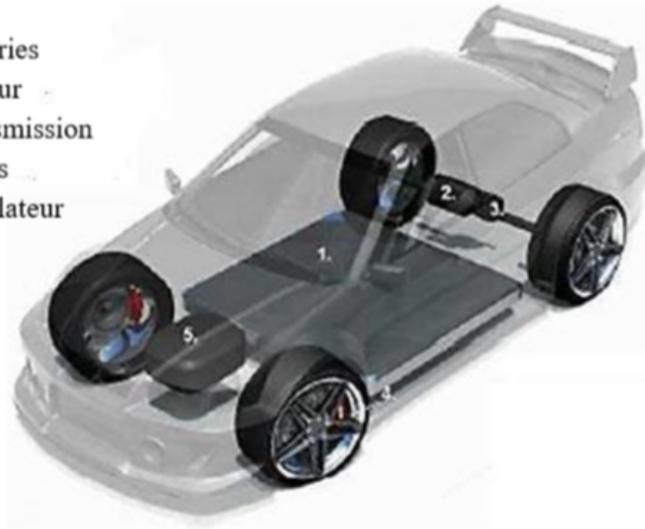


FIGURE I.1 – Système de propulsion d'un VE

Compte tenu des progrès scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, les systèmes de gestion de l'énergie, ... etc., beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions sont explorées pour développer ce mode de propulsion. Le système de propulsion électrique a une architecture très simple. Il est constitué d'un actionneur électrique, un dispositif de transmission, et des roues (Figure I.1).[7]

I.2.2 Historique

Le premier véhicule électrique fit son apparition dans les années 1830 (1832-1839). La première personne à avoir inventé une voiture électrique fut Robert Anderson, un homme d'affaire écossais. Il s'agissait plutôt d'une carriole électrique. Vers 1835, l'américain Thomas Davenport construit une petite locomotive électrique. Vers 1838 l'écossais Robert Davidson arriva avec un modèle similaire qui pouvait rouler jusqu'à 6 km/h. Ces deux inventeurs n'utilisaient pas de batterie rechargeable.

En 1859, le français Gaston Planté inventa la batterie rechargeable au plomb acide, qui sera améliorée par Camille Faure en 1881. En 1884, on voit sur la photo de la (Figure I.2) Thomas Parker assis dans une voiture électrique, qui pourrait être la première au monde.[13]



FIGURE I.2 – Une des premières voitures électriques (Thomas Parker 1884)

En 1897, on peut apercevoir les premiers taxis électriques dans les rues de New York. En 1899 en Belgique, une société construit "La Jamais Contente" la première auto électrique à dépasser les 100 km/h (elle atteindra les 105 km/h). L'auto était pilotée par le belge Camille Jenatton, et munie de pneus Michelin. Elle était en forme de torpille (Figure I.3). [13]

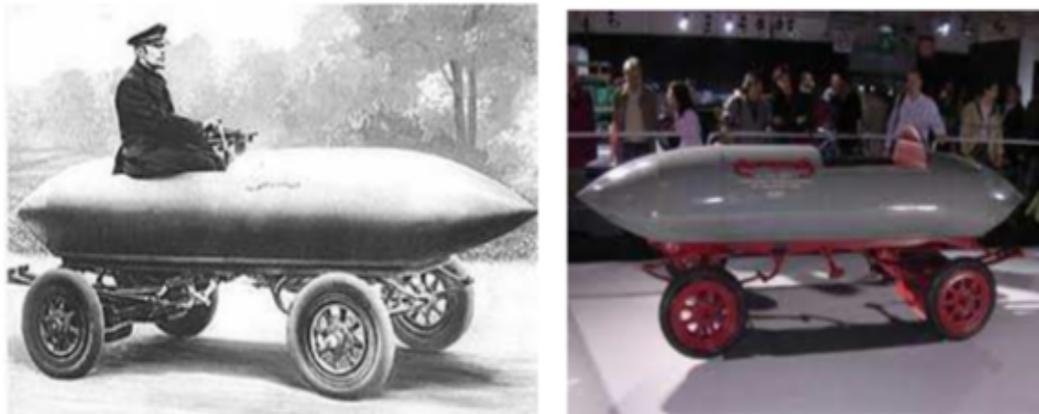


FIGURE I.3 – La Jamais Contente 1899

Dès 1900, la voiture électrique connaît ses beaux jours. Plus du tiers des voitures en circulation sont électriques, le reste étant des autos à essence et à vapeur. Dans les années 1920, certains facteurs mèneront au déclin de la voiture électrique. On peut citer leur faible autonomie, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que les Ford à essence. En 1972, Victor Wouk, le parain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de GM

(General Motors). Dès 1988, le président de GM Roger Smith lance un fond de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra la EV 1 et qui va être produite entre 1996 et 1998 (Figure I.4).[13]



FIGURE I.4 – La voiture électrique EV1(GM 1996)

En 1997, Toyota lance la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires ont été vendus au Japon la première année et en 2006 Toyota a passé le cap des 500.000 unités vendues à travers le monde avec son célèbre véhicule hybride, la Prius (Figure I.5) De 1997 à 2000, de nombreux constructeurs lancent des modèles électriques hybrides : la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV.[13]



FIGURE I.5 – La Prius (TOYOTA 1997)

En 2003 en France, Renault fait une tentative avec la sortie de sa voiture hybride Kangoo Elect'road mais abandonne la production après environ 500 véhicules.[13]

En 2008 Tesla a démarré la production en série du premier véhicule, le Roadster Tesla(Figure I.6).[4]



FIGURE I.6 – Le Tesla Roadster I

Il est capable d'atteindre les 100 km/h en 3,9 secondes, sans émettre de rejets directs. Sa propulsion est en effet 100 % électrique, sa vitesse de pointe est limitée électroniquement à 210 km/h.

En 2010 et 2011, Toyota et EDF testent une nouvelle voiture hybride dérivée de la Prius, en vue d'une future commercialisation. L'expérimentation a lieu dans la ville de Strasbourg. Cette voiture essence hybride est rechargeable sur une prise électrique domestique, ce qui permet pour les petits trajets de rouler exclusivement à l'électricité, la propulsion essence étant dans ce cas réservée aux trajets plus longs.

Volkswagen lance à l'automne 2017 son programme d'électrification « Roadmap E », qui vise à fabriquer jusqu'à trois millions de véhicules électriques par an et à commercialiser 80 nouveaux modèles au sein des différentes marques du groupe.

En 2019, les grands constructeurs automobiles japonais annoncent tous de petits véhicules électriques susceptibles de casser la barrière de prix qui freine le développement de ce segment : nouvelle Honda e (Figure I.7), Nissan IMk, petit modèle Toyota ultra-compact électrique à deux places destiné aux conducteurs débutants, aux personnes âgées et aux ruraux.[1]



FIGURE I.7 – Honda e

I.2.3 Architecture du véhicule électrique

La solution la plus simple pour réaliser un véhicule électrique est de le construire sur la base d'un véhicule thermique existant, en remplaçant le moteur thermique par un moteur électrique. Cependant, la transmission mécanique peut être simplifiée. La capacité des moteurs électriques à démarrer à couple élevé et de fonctionner sur une large plage de vitesse.

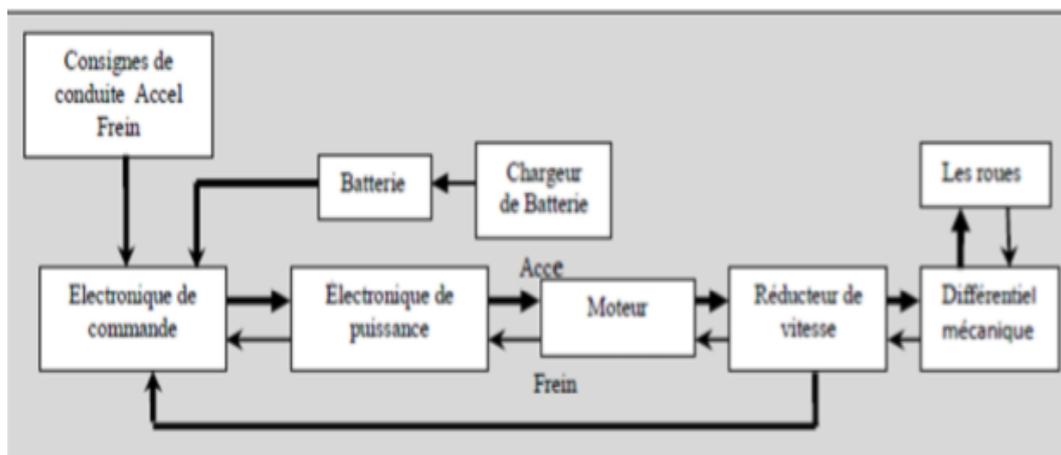


FIGURE I.8 – Schéma synoptique d'une chaîne de traction[30]

Par contre, comme le couple est une grandeur dimensionnée, l'absence de boîte de vitesse implique un moteur plus lourd, plus encombrant et donc plus coûteux. Aussi, pour réduire la masse embarquée, les VE peuvent être conçus avec un réducteur qui permet

au moteur électrique de travailler à grande vitesse. Ce réducteur permet de réduire la taille du moteur grâce à la réduction du couple demandé. Cette chaîne de traction centrée autour d'un seul moteur de traction couplé à un réducteur à rapport fixe représente la solution dite classique pour l'architecture des VE (Figure I.8) [9]

I.2.4 Fonctionnement d'un véhicule électrique

La batterie stocke l'électricité. Elle est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. Le régulateur sert à régler l'intensité du courant qui alimente le moteur. Son fonctionnement est assez simple : lorsque le conducteur du véhicule appuie sur la pédale de l'accélérateur, la batterie libère du courant. Le convertisseur transforme alors le courant continu (DC) de la batterie en courant alternatif (AC).

Le convertisseur est une partie intégrante du moteur. Le point fort du véhicule électrique est la chaîne de transmission électromécanique. En effet, un véhicule a besoin d'un couple élevé à basses vitesses afin de pouvoir accélérer et d'un couple moins important à des vitesses de croisière. Ces spécificités sont celles d'un moteur électrique. D'un point de vue mécanique, donc, un véhicule électrique est plus simple qu'un véhicule à moteur thermique : pas d'embrayage, pas de boîte de vitesses (Figure I.9). [27]

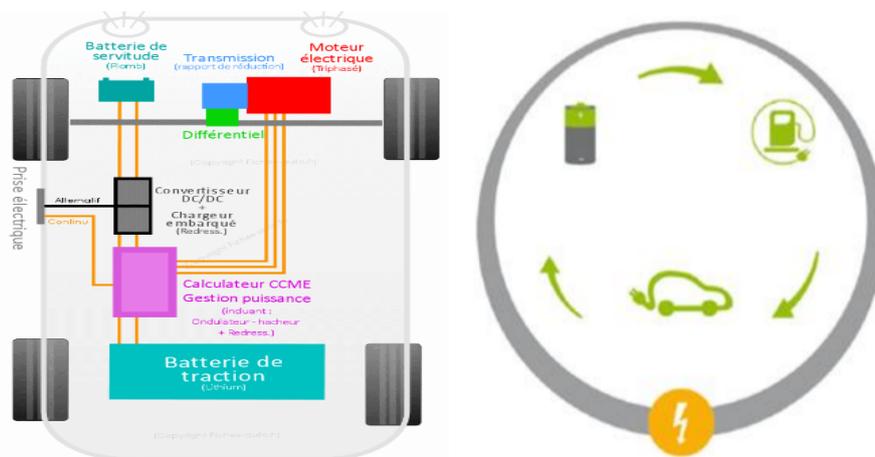


FIGURE I.9 – Principe de fonctionnement d'un véhicule électrique

I.2.5 Classification des véhicules électriques

1- Véhicule tout électrique

Le véhicule tout électrique utilise la seule énergie fournie par les batteries. Cette énergie est utilisée pour alimenter un ou plusieurs moteur(s) électrique(s). La solution électrique répond doublement aux exigences de la circulation urbaine, par son absence de pollution gazeuse et de nuisance sonore. La constitution de cette voiture est nettement plus simple que celle d'une voiture à essence, les composants sont plus petits, la taille réduite et la

simplicité des composants permettent de mettre au point des véhicules petits et légers.[13]

2- véhicule hybride

Un véhicule hybride est un véhicule disposant d'au moins deux sources d'énergie, typiquement un réservoir de carburant et une batterie, associés à des machines de conversion de l'énergie, telles que les moteurs électriques et les moteurs à Combustion interne[19].

On définit communément trois familles d'architectures hybrides :

a- Véhicule hybride série :

Dans l'architecture série, seul le moteur électrique est connecté directement aux roues et leur transmet un couple. Le moteur électrique est donc dimensionné pour pouvoir assurer seul la traction du véhicule, selon la demande de couple du conducteur. La Figure I.10 schématise le fonctionnement d'un véhicule hybride série. Le moteur électrique est alimenté soit par des batteries, soit par une génératrice entraînée par le moteur thermique, soit par un mélange des deux.[19]

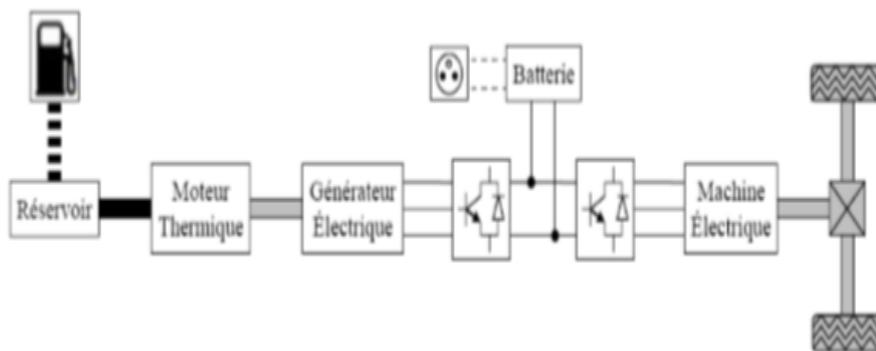


FIGURE I.10 – Principe de l'architecteur série

b- Véhicule hybride parallèle :

La première idée est de faire deux véhicules en un, en bénéficiant des avantages de chacun. Le VHP possède ainsi deux moteurs fonctionnant en parallèle, un électrique et un thermique. Les deux moteurs sont utilisés séparément et on résout alors le problème écologique du moteur thermique en ville, en fonctionnant en mode électrique et celui de l'autonomie du véhicule électrique pour les grands déplacements hors des agglomérations en fonctionnant en mode thermique (Figure I.11).[17]

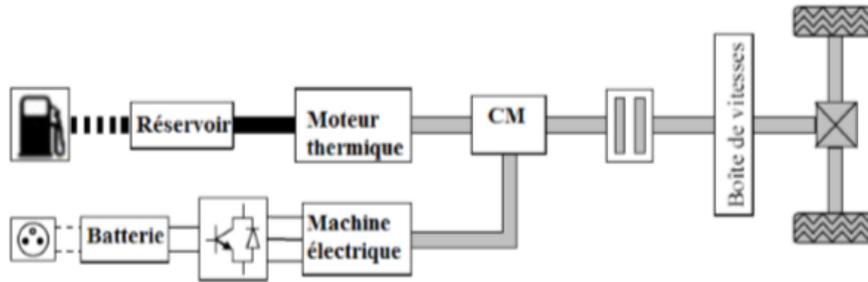


FIGURE I.11 – Principe de l'architecteur parallèle[19]

c- Véhicule hybride combiné :

La catégorie des architectures combinées correspond aux hybrides série/parallèle, dont la Toyota Prius fait partie. Appelée aussi hybride parallèle à dérivation de puissance, cette architecture intègre un moteur électrique, une génératrice, et un moteur thermique. Grâce à une gestion efficace des puissances demandées d'un côté, et fournies de l'autre, il est possible de contrôler en régime le moteur thermique, et de partager son couple entre les demandes du véhicule, et la recharge de la batterie. La Figure I.12 schématise le fonctionnement d'un hybride combiné. [19]

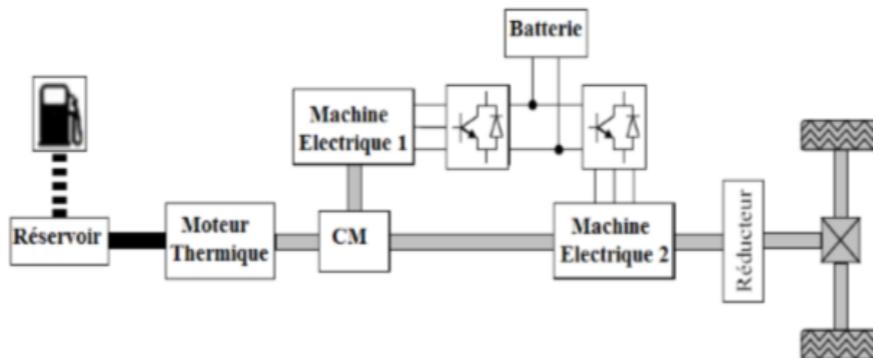


FIGURE I.12 – Principe de l'architecteur hybride combiné, type Prius

I.3 Les organes pour le contrôle longitudinal

La Figure I.13 présente une schématisation par blocs des organes principaux du contrôle longitudinal du véhicule. Les sous-systèmes qui interviennent dans la dynamique longitudinale sont constitués du groupe motorisation, du système de freinage, du groupe embrayage ou convertisseur de couple, de la transmission, des roues et du contact pneu/chaussée. Le contrôle global de ces éléments permet au véhicule de réaliser des freinages, accélérations, arrêts et démarrages.[32]

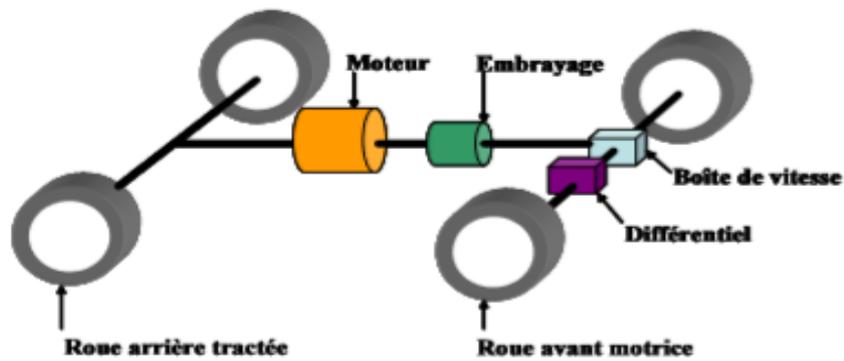


FIGURE I.13 – Les organes constitutifs du mode longitudinal

a- Le système de propulsion

Le système de propulsion électrique (figure I.14) est l'organe principal du véhicule électrique, ce dernier est propulsé électriquement par des moteurs et comporte un système de transmission formé par un ou plusieurs moteurs électriques entraînant deux roues motrices.[8]

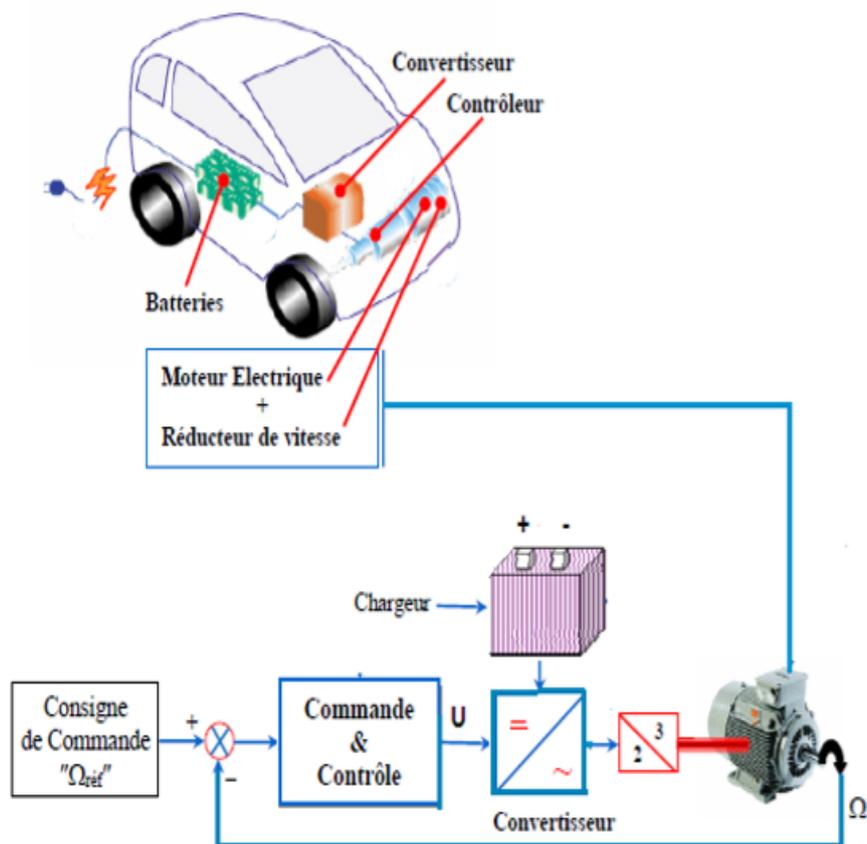


FIGURE I.14 – Synoptique d'un Système de Propulsion

b- Le Bloc Moteur Electrique

Le moteur électrique est l'élément indispensable du véhicule électrique, il doit être robuste, fiable et pratiquement sans entretien, ce qui est plus indiqué pour le moteur à induction. Selon le type de propulsion, il peut y avoir un ou plusieurs moteurs. Par ailleurs, différents types de moteurs peuvent être utilisés pour la propulsion, et cela dépend de plusieurs paramètres et contraintes du type de propulsion (véhicule lourd ou léger, faible ou grande puissance, etc.) [8]

c- Le Bloc de Commande

Le bloc de commande est le cerveau du système de propulsion, son rôle est de capter les informations d'état du système (vitesse de rotation, courants, etc.) de les traiter et d'agir en conséquence pour la génération des signaux de commande, appliquées au moteur électrique afin de gérer au mieux la consommation d'énergie.[8]

d- Le Bloc de Puissance

Une autre vision sur les systèmes électroniques a émergé, cela est dû à l'évolution des semi-conducteurs. En effet, les convertisseurs de puissance permettent maintenant d'élargir le champ d'application des machines électriques. Un convertisseur de puissance est un dispositif de puissances qui assure la liaison entre la source batteries et la machine à commander en modulant l'énergie disponible pour le besoin. [8]

I.4 Les organes pour le contrôle latérale

La dynamique latérale du véhicule est régie par le volant, la colonne de direction, les roues directrices et le contact pneu/chaussée comme le montre la Figure I.15. Ces éléments permettent au véhicule de se déplacer latéralement par action du conducteur sur le volant, d'évoluer dans un virage et d'effectuer des changements de voie. Dans le cadre de l'application, un moteur à courant continu est disposé sur la colonne de direction pour assister le conducteur dans ses manoeuvres[33].

L'application principale de la commande latérale des véhicules est le maintien dans la voie (en anglais : Lane keeping) qui permet à un véhicule de suivre la route à partir d'informations de positions vis à vis de la trajectoire. La réalisation du Lane keeping nécessite une bonne maîtrise des commandes de bas niveau qui permettent de piloter les actionneurs.[12]

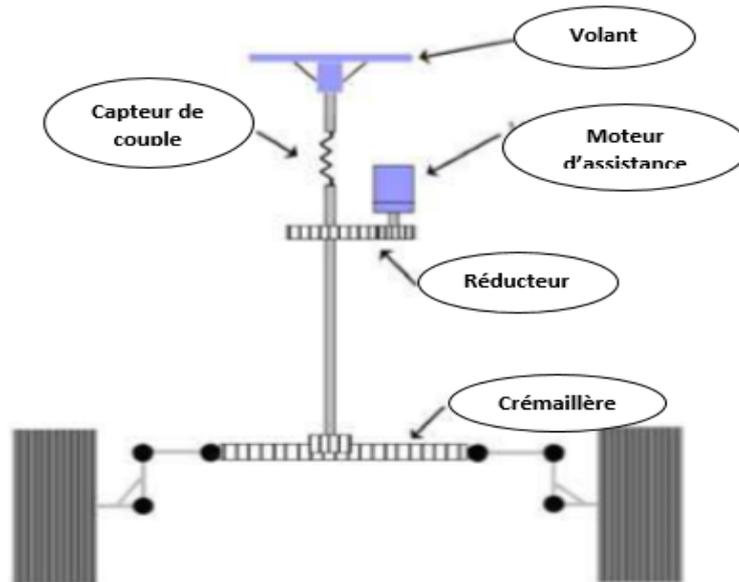


FIGURE I.15 – Les organes de la dynamique latérale du véhicule

Le contrôle latéral trouve beaucoup d'applications dans le domaine de l'assistance à la conduite. L'adjonction d'un couple supplémentaire à celui exercé par l'automobiliste dans les manoeuvres de suivi de voie ou bien pour les rejets de perturbations sont autant de stratégies prometteuses à l'étude.[32]

Les systèmes de contrôle latéral du véhicule se servent principalement de capteurs extéroceptifs qui positionnent le véhicule par rapport à sa voie de circulation, de capteurs proprioceptifs qui mesurent la dynamique du véhicule, ainsi que d'actionneurs agissant sur le braquage des roues directrices.

Pour positionner le véhicule dans son environnement, plusieurs solutions ont été retenues dans la littérature :

1- Le câble rayonnant : Ce système a été le premier moyen utilisé pour localiser le véhicule par rapport à l'axe de la voie. Le principe de fonctionnement est fondé sur un câble posé au sol le long de la trajectoire à suivre, dans lequel circule un courant électrique et le véhicule détecte le champ magnétique ainsi rayonné.

2- Le système des magnétomètres et des plots magnétiques : Les systèmes de positionnement magnétiques se composent d'aimants enterrés (plots) le long de l'axe de la voie de circulation et d'un ou plusieurs magnétomètres installés principalement sous les pare-chocs avant et arrière. Le champ magnétique est détecté par les magnétomètres et l'écart latéral est déduit à partir de l'intensité du champ émit par chaque plot.

3- Le GPS différentiel : Le GPS « Global Positioning System » est un système de positionnement par satellite, à vocation militaire, initialement déployé par le Département de la Défense des États-Unis et qui est devenu récemment très répandu dans les applications routières. Il fonctionne par un système d'émission-réception entre des satellites et le récepteur dont la position a besoin d'être identifiée.

4- Le capteur vidéo : Les monocaméras en vision frontale sont peut-être les plus utilisées dans la détection de marquages latéraux, donc dans le positionnement du véhicule par rapport à sa voie de circulation. Récemment, elles se sont imposées pour plusieurs applications d'assistance latérale commercialisées, comme par exemple sur Volkswagen Passat CC.

Les capteurs proprioceptifs complètent les informations nécessaires pour réaliser le contrôle latéral du véhicule.[15]

I.5 Les organes pour le contrôle verticale

Le rôle du système de suspension d'une automobile est d'isoler la carrosserie et ses passagers des inégalités rencontrées par les roues sur la chaussée.[2]

Dans le monde de l'automobile, il existe trois types de suspensions : la suspension passive, la suspension semi-active et la suspension active. Le cas passif se retrouve dans la majorité des véhicules. Généralement, il est composé d'un ressort et un amortisseur assemblés en parallèle. Le cas semi-actif consiste à contrôler le système le plus souvent seulement grâce un amortisseur ajustable. Dans le cas actif, le système de contrôle classique ou intelligent peut réagir en fonction des paramètres du véhicule et de la route.[6]

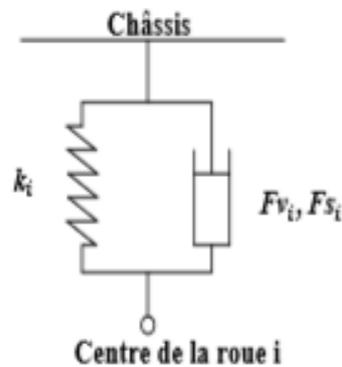


FIGURE I.16 – Schéma d'une suspension

De nombreuses techniques sont employées pour obtenir un compromis satisfaisant entre bonne tenue de route et confort. La quasi totalité de ces techniques utilisent un système de ressorts pour supporter le poids de la voiture, associés à des amortisseurs dont le but est de freiner le mouvement des ressorts, afin d'éviter les rebonds.[2]



FIGURE I.17 – Le système de suspension avant en transparence

I.6 Les systèmes de transport intelligents STI

Sans avoir une définition unifiée, les systèmes intelligents de transport (ITS, « Intelligent Transportations Systems ») désignent les recherches et les technologies appliquées au transport pour le rendre plus sûr, plus efficace ou plus écologique. L'objectif est de pourvoir le véhicule en systèmes qui informent et assistent le conducteur dans sa tâche de conduite. La recherche et développements dans le domaine des ITS ont suivi approximativement le meme parcours dans le monde entier et ont connu plusieurs ré-orientations au cours de ces dernières décennies. [16][38]

I.7 Les systèmes de sécurité

Les voitures électriques représentent une nouvelle technologie, introduisant des composants électriques à bord du véhicule, et les différents risques associés doivent être rigoureusement recensés. Pour la sécurité reliée aux voitures électriques, plusieurs aspects sont à prendre en considération. [3]

I.7.1 protection contre les chocs électriques

- **Protection contre le contact direct** : Protection des personnes contre tout contact direct avec les parties électriques actives du système de traction qui doit être assuré par une isolation adéquate et par une position inaccessible de ces parties.

- **Protection contre le contact indirect** : Le problème de contact indirect est souvent lié aux problèmes de structure. Un contact entre le circuit de traction et la structure peut conduire à des situations dangereuses telles que :

- ▷ Les court-circuit
- ▷ Électrocution
- ▷ Comportement imprévu et/ou incontrôlé du véhicule [3]

I.7.2 La sécurité de la batterie

Pour une voiture électrique, la batterie représente le composant le plus important, mais elle est à l'origine de plusieurs phénomènes dangereux tels que des phénomènes dangereux électriques, mécaniques, chimiques, sans oublier le risque d'explosion. [3]

I.7.3 Risque électrique

- **Protection contre électrocution** : Le boîtier des batteries doit être renforcé en cas de besoin,

- **Protection contre les court-circuits** : Les batteries de traction ont des courants de court-circuit considérablement élevé, or, des dispositifs de sécurité tel que des fusibles sont à mettre en place, notamment au centre électrique de la batterie. [3]

I.7.4 La sécurité des opérations de chargement des batteries

Durant le chargement de la batterie, la voiture se trouve connectée au réseau principal d'électricité, donc des mesures de prévention doivent être prises pour éviter le risque d'électrocution. Ces mesures de prévention dépendent principalement du type de chargeurs :

- Chargeur externe,
- Chargeur embarqué. [3]

I.8 Stratégie de la gestion d'énergie et source d'énergie électrique

I.8.1 Les batteries

La batterie est un système de stockage d'électricité sous forme chimique, pouvant fonctionner de manière réversible (en courant pas en tension), caractérisée par sa capacité et son énergie massique, afin d'alimenter le véhicule d'une façon permanente. L'énergie chimique stockée dans chaque pile est convertie directement en énergie électrique lorsque les bornes de la batterie sont connectées à un consommateur électrique. La figure I.18 représente la vue interne d'une batterie utilisée dans les véhicules électriques.[40]

Le principe de fonctionnement de celle-ci est que la réaction chimique entre les électrodes et l'électrolyte provoque une oxydoréduction. Dans ce cas, l'électrode négative subit une oxydation, c'est-à-dire que la réaction chimique libère des électrons, tandis que l'électrode positive subit une réduction, autrement dit elle absorbe des électrons. Ce déséquilibre des charges électriques génère la F.E.M (Force électro Motrice) de l'accumulateur.[40] Elles peuvent être en plomb, en Ni-Cd, en Ni-Mh ou en lithium.

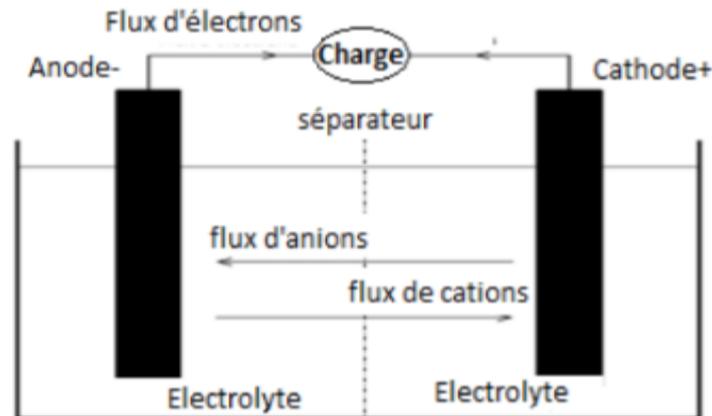


FIGURE I.18 – La vue interne d'une batterie

- **Batteries Plomb-Acide** : Inventée en 1859, est à la fois la batterie la plus ancienne et la plus utilisée des accumulateurs électrochimiques. Sa tension par élément est de 2V. Sa version pour automobile, beaucoup plus récente (1970-1975). Aujourd'hui, la batterie au plomb est la technologie la plus répandue dans les applications automobiles car elle est la plus mature, la moins onéreuse et la plus facile à recycler. Cependant, cette technologie présente une énergie massique faible, elle est polluante et son recyclage n'est pas rentable. Elle tend donc à disparaître compte tenu des contraintes environnementales de plus en plus drastiques.[36]



FIGURE I.19 – Batterie au plomb de Hawker l'Armasafe

- **Batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd)** : largement utilisées au XXe siècle, souffrent en partie des mêmes problèmes que celles au plomb en termes de performances. et la toxicité du cadmium contenu dans ces batteries fait que leur usage est très encadré et que leur application risque d'être limitée.[14]



FIGURE I.20 – Batterie au nickel-cadmium (Ni-Cd) de saft type MRX

● **Batteries Nickel-Hydrure métallique (Ni-MH)** : sont largement utilisées à l'heure actuelle dans les VEH, et sont réputées avoir une longue durée de vie et une meilleure densité énergétique que les deux premières.[14]

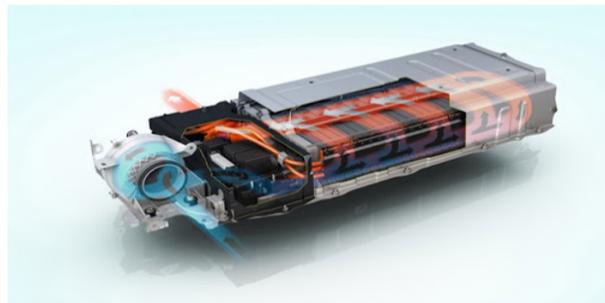


FIGURE I.21 – La batterie Ni-Mh de la Toyota Prius

● **Batteries au Lithium-ion** : Elles possèdent de très fortes densités énergétiques et une importante énergie massique, ce qui favorise leur utilisation dans le secteur du transport et particulièrement pour les véhicules électriques qui nécessitent des batteries à grande capacité. [14]



FIGURE I.22 – Les batteries au lithium polymère de Nissan

Batteries	Plomb acid	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-ion
Densité énergétique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	160-200
Nombre de cycles (charge/décharge)	500 à 800	1000 à 2000	600 à 1500	400 à 1200
Temps de charge	6 à 12h	1 à 2h	2 à 4h	2 à 4h
Température de fonctionnement	-20 à 20C	-40 à 60C	-20 à 60C	-20 à 60C

TABLE I.1 – Les batteries au lithium polymère de Nissan

I.8.2 Les super condensateurs

Les super condensateurs stockent l'énergie sous forme électrostatique. Ils sont des systèmes de stockage d'énergie de faible densité d'énergie mais d'une densité de puissance importante. Par conséquent, ils sont utilisés dans les phases transitoires pour fournir les pics de puissance demandés, afin de réduire les sollicitations en courant, de diminuer la taille et d'augmenter la durée de vie de la source principale d'énergie (moteur thermique, batteries ou pile à combustible).[10]



FIGURE I.23 – Exemple de supercondensateurs et leur modules

Pour remédier aux problèmes de surdimensionnement des batteries dans les applications VEH, les super condensateurs présentent des propriétés très intéressantes. En effet, le stockage de l'énergie électrique est de nature électrostatique, la cinétique du transfert de

charge est plus rapide que dans le cas des batteries. De plus, les réactions d'oxydoréduction irréversibles qui peuvent contribuer au vieillissement des éléments sont inexistantes. [24]

Constructeur	Capacité / Tension nominal (F)/(V)	Poids (kg)	Energie massique (Wh/kg)	Puissance massique (W/kg)	Type
Maxwell	3000/2.7V	0.51	6	1200	Organique
Batscap	2600 / 2,7V	0,5	5,3	20 000	Organique
Esma	80 000 / 1,7V*	2,8	9	500	Aqueuse
Nesscap	3 000 / 2,7V	0,53	5,73	11 000	Organique

TABLE I.2 – Donnée constructeur de divers supercondensateurs

I.8.3 Les volants d'inertie

Les volants d'inertie stockent l'énergie électrique sous forme d'énergie cinétique. Ils sont soit totalement mécanique avec un système d'embrayage et un multiplicateur de vitesse (Figure I.24b) soit le système est composé d'un volant entraîné par une machine électrique (Figure I.24a). Les points positifs sont la durée de vie des éléments sous vide et la puissance massique. La sécurité est le problème majeur de cette technologie car le rotor tourne à très haute vitesse (jusqu'à 80 000tr/min). Quelques exemples d'application de volant d'inertie dans les véhicules lourds (sauf l'UPS de Vycon qui est une application statique), sont présentés dans le Tableau 1.3 [10] :

	Puissance (kW)	Energie (Wh)	Vitesse (tr/min)	Masse (kg)	Année
KERS (Flybrid Kinetic Energy Recovery System) Flybrid systems, 2012	60	111	60 000	25	2009
Flybus [Fuller, 2011]	60 (100 max)		60 000	10	2011
VYCON VDC (UPS) [VYCON, 2012]	251	833	36 000	700	2009

TABLE I.3 – Exemples des volants d'inertie

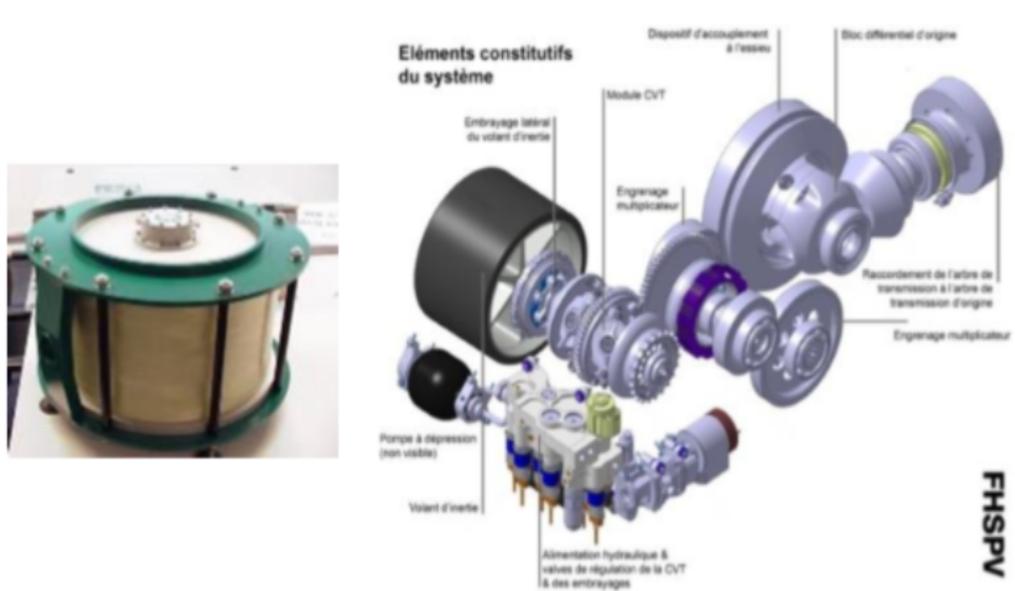


FIGURE I.24 – (a) volant d’inertie du tramway Citadis[Alstom,2007], (b) volant d’inertie 100% mécanique de Jaguar

I.9 Le chargeur

Le chargeur de batterie est aussi important que tous les autres composants des véhicules électriques, ce dernier joue le rôle de la ‘station-service’. Pour cela plusieurs systèmes de recharge ont alors été conçus.[40]



FIGURE I.25 – Chargeur d’un VE

I.9.1 Principe de fonctionnement du chargeur

Les chargeurs de batteries sont spécifiques au type d’alimentation électrique, c’est-à-dire monophasée ou triphasée, à leur emplacement (embarqués ou non au sein du véhicule) et au mode de transmission de l’énergie. Dans le cas d’une alimentation par courant alternatif, la charge s’effectue généralement en deux étapes, illustrées par la figure suivante.[9]

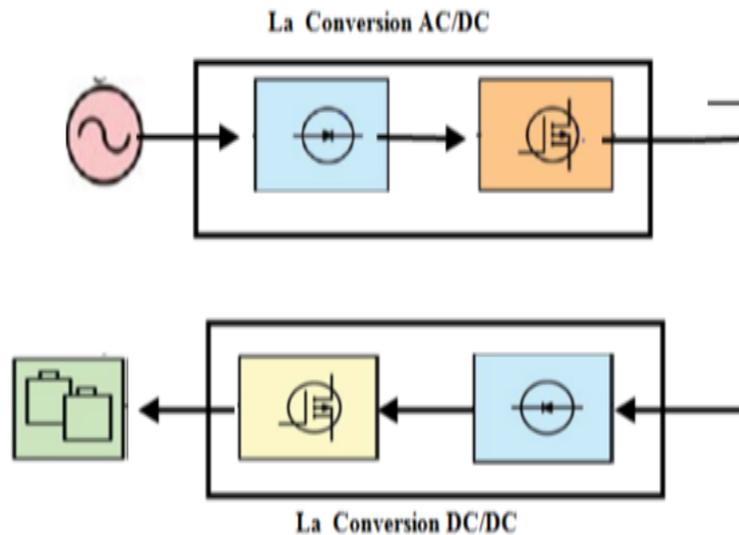


FIGURE I.26 – Synoptique des étapes de conversion d'un chargeur

- **Conversion AC/DC :**

La transformation du courant alternatif délivré par le réseau de distribution en courant continu est réalisée soit par un pont redresseur à diodes, ou par d'autres systèmes tels que, un pont à thyristors ou un convertisseur à absorption sinusoïdale de courant.[9]

- **Conversion DC/DC :**

Le courant continu obtenu à l'issue de la première conversion est modifié pour correspondre au profil de charge de la batterie. Une alimentation à découpage permet par exemple d'adapter la puissance en entrée de la batterie. Cette conversion introduit généralement une isolation galvanique de sécurité.[9]

Il s'agit d'une part des chargeurs de type "lent". Et d'autre part des chargeurs de type «rapide».

- **Chargeur de type "lent" :** Le chargeur de type "lent" est un dispositif d'une puissance moyenne, généralement de 3 kW. Il nécessite pour une charge complète du pack de batteries une durée de 5 à 8 heures. Cette opération peut donc s'effectuer en heures creuses.[40]

- **Chargeur de type "rapide" :** Les structures, dont la puissance transmise est supérieure à 10 kW, ont été classées dans les chargeurs dits "rapides". La puissance maximale atteint aujourd'hui 150 kW. L'objectif de ce type de montage est de permettre, en peu de temps (inférieur à 30 min.) une recharge partielle (80 %) des batteries. [40]

I.10 Avantages et inconvénient des VE

Avantages du VE :

La voiture électrique possède plusieurs avantages qui permettront aux consommateurs de faire à terme la différence entre les véhicules électriques et les véhicules thermiques :

- Les véhicules électriques sont agréables à conduire, avec un roulement qualifié de « doux » en raison d'une accélération continue et progressive car le moteur ne cale jamais (absence d'embrayage).
- Ces véhicules sont plus faciles d'entretien et leurs dépenses sont réduites de 30 à 40 (par exemple le moteur électrique ne requiert pas de vidange). De plus, les occasions de pannes sont 3 fois moins nombreuses.
- Le moteur électrique a un rendement énergétique 3 fois plus élevé que celui d'un moteur thermique.
- Le démarrage est très rapide, il suffit d'appuyer sur un bouton pour quelle se mette en marche (fini les problèmes de démarrages pendant les temps froids d'hiver).
- Le principal avantage est l'indépendance vis-à-vis du pétrole.

Inconvénients du VE :

Comme la voiture électrique possède plusieurs avantages, elle a aussi des malle-faits :

- D'autant que comme les produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix de ces voitures devrait être élevé.
- Ainsi la durée de recharge des batteries électriques est encore importante. De plus, lors de l'utilisation, le moteur électrique ne produit pas de chaleur. L'habitacle de la voiture n'est pas chauffé. Pour un meilleur confort (climatisation, radio, etc.), la décharge des batteries est accélérée.
- La durée de vie de la batterie et la puissance du moteur électrique ne sont pas encore très importantes.[21]

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une présentation générale des véhicules électriques (VE) puis nous avons exposé leurs évolutions à travers le temps, ensuite nous avons nommé leurs différents types ainsi que leurs classification selon la gestion d'énergie. Nous avons présenté aussi les différents organes pour le control longitudinale, latérale et verticale du VE aussi que les systèmes d'assistance et de sécurité. Le système de gestion d'énergie a été également détaillé en présentant les différents types de source d'énergie.

Dans le prochain en présentera un modèle latérale du VE ainsi qu'une synthèse de commande linéaire pour l'asservissement de la dynamique latérale du système.

Chapitre II

MODÉLISATION ET COMMANDE LINÉAIRE DE LA DYNAMIQUE LATÉRALE DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE

II.1 Introduction

Le comportement dynamique d'un véhicule est la réponse qu'il donne face à un certain nombre d'excitations internes et externes à savoir : les manœuvres du conducteur, les perturbations atmosphériques, les effets de l'interaction pneumatique/chaussée et la variation des caractéristiques géométriques de la route.

La modélisation du véhicule dans son ensemble est une tâche difficile à réaliser. Ceci est dû à la multiplicité de ses constituants et qui, en interagissant, donnent lieu à des non-linéarités. Pour cette modélisation le véhicule est décomposé en sous-modèles, développés séparément jusqu'à l'obtention d'une modélisation globale décrivant les variables de l'état dynamique du véhicule (Figure II.1).[28]

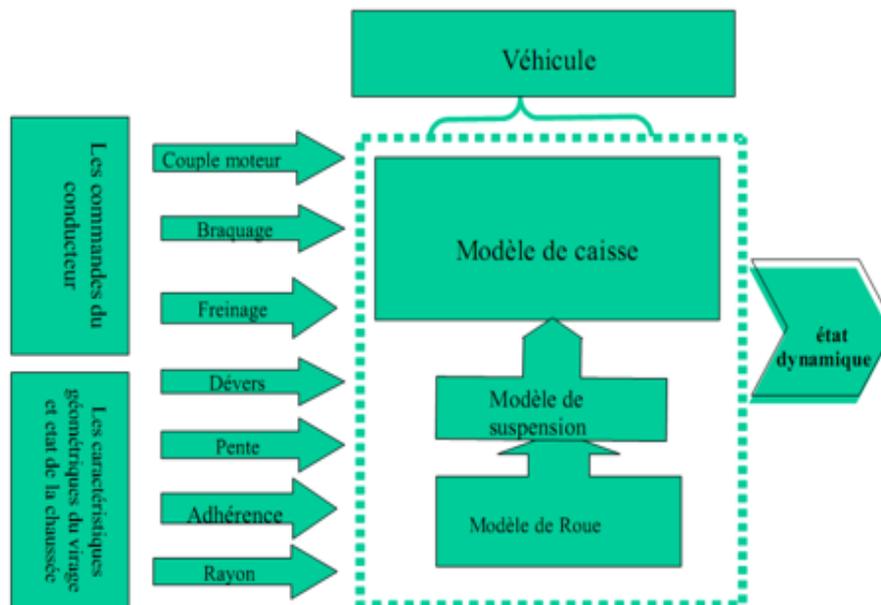


FIGURE II.1 – Schéma descriptif du véhicule et de ses sous-ensembles

Comme le montre la figure (III.1) :

- Les sous-modèles du modèle global sont : la caisse, le mécanisme de suspension et les roues. Ces sous-ensembles composent la structure principale du véhicule.

- Les entrées du modèle global sont :

- Les commandes du conducteur : le braquage, le couple moteur, l'accélération ou le freinage.
- Les caractéristiques géométriques du virage : le dévers, le rayon, la pente.
- L'état de la chaussée : l'adhérence.

- La sortie du modèle représente l'état dynamique du véhicule, elle exprime les mouvements de translation et de rotation du centre de gravité de la caisse.

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'étude de la dynamique latérale du VE en présentant un modèle à 3 degrés de liberté traduisant la dynamique du véhicule. Ces trois degrés de libertés concernent l'évolution du déplacement longitudinal (par rapport à l'axe X), du déplacement latéral (par rapport à l'axe Y) et le lacet (rotation autour de l'axe Z) du véhicule[28].

Ensuite nous développons une stratégie de commande linéaire pour l'asservissement de la dynamique latérale du véhicule; un régulateur linéaire de type PI sera intégré et des différents tests seront effectués pour vérifier les performances et la robustesse de ce régulateur vis-à-vis des perturbations et des variations paramétriques.

II.2 Modélisation du VE(modèle latérale)

Dans ce paragraphe nous décrivons la modélisation du véhicule en considérant un déplacement long de des axes X, Y, ainsi qu'une rotation autour l'axe Z. Les rotations autour de ces trois axes sont respectivement :

- Le roulis, autour de l'axe X qui décrit le mouvement longitudinal de véhicule.
- Le tangage, autour de l'axe Y qui décrit le mouvement latéral de véhicule.
- Le lacet, autour de l'axe Z qui décrit le mouvement vertical de véhicule.

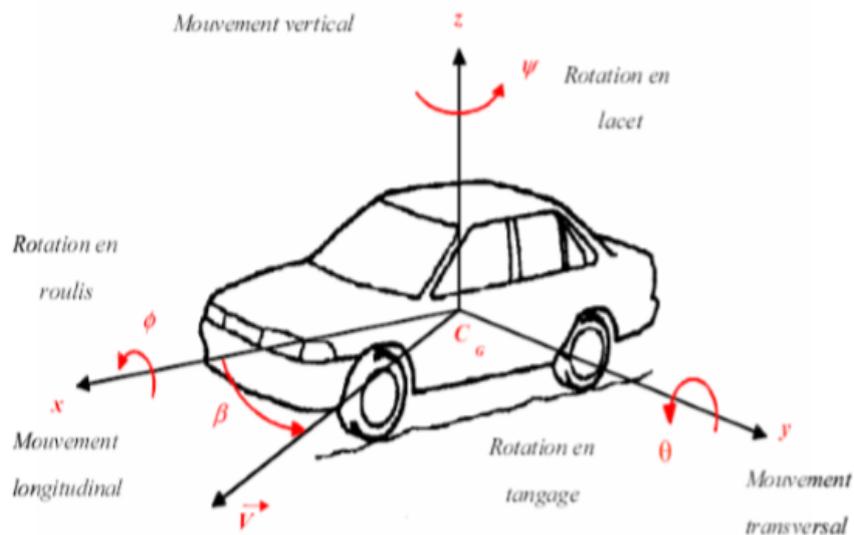


FIGURE II.2 – Les différents mouvements de véhicule

Pour décrire la cinématique du véhicule, nous employons un modèle à trois degrés de liberté. Le système d'axes cartésien (X o Y) est utilisé pour étudier le déplacement du

centre du gravité(CG) du véhicule auquel on associe un système d'axes (x, y) On définit aussi l'angle de lacet entre les repères ox et oX (Figure II.2).

Afin d'obtenir le modèle du véhicule, les principes fondamentaux de la mécanique des corps solides (principes de Newton) doivent être appliqués. Le premier principe concerne l'équilibre des forces extérieures agissant sur le véhicule, et le deuxième concerne l'équilibre des moments dynamiques du véhicule par rapport aux moments extérieurs.

A base de ces deux principes fondamentaux de la dynamique du véhicule, les forces généralisées, et le moment de rotation totale autour de l'axe Z sont exprimées par :

$$\begin{cases} M\ddot{X} = F_x \\ M\ddot{Y} = F_y \\ J_z\ddot{\psi} = M_z \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Où J_z le moment d'inertie du véhicule suivant l'axe Z.

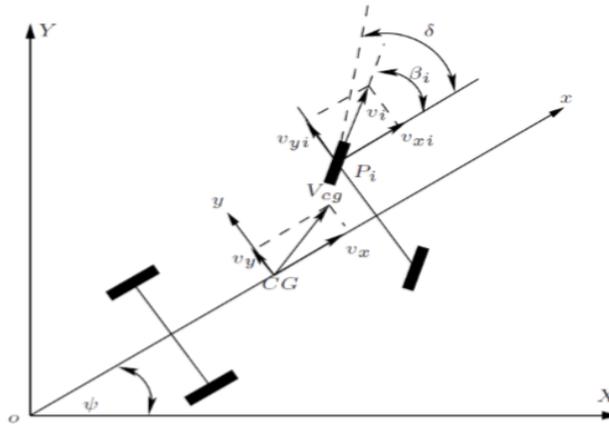


FIGURE II.3 – Mouvement du véhicule dans le système d'axe (X,Y)

A l'aide d'une simple rotation d'un angle ψ autour de l'axe \vec{oZ} , on peut évaluer le vecteur de la vitesse associé au CG du véhicule.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ r \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Où V_x et V_y sont les vitesses du véhicule dans le plan(x,y) et r est sa vitesse de lacet.

En dérivant (II.2) par rapport au temps, on obtient les accélérations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{d\dot{X}}{dt} = \dot{V}_x \cos(\psi) - V_x \dot{\psi} \sin(\psi) - \dot{V}_y \sin(\psi) - V_y \dot{\psi} \cos(\psi) \\ \frac{d\dot{Y}}{dt} = \dot{V}_x \sin(\psi) + V_x \dot{\psi} \cos(\psi) + \dot{V}_y \cos(\psi) - V_y \dot{\psi} \sin(\psi) \\ \frac{d\dot{\psi}}{dt} = \dot{r} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Tenant compte de (II.1), dans les équations du système (II.3), on obtient :

$$\begin{cases} \frac{F_x}{M} = (\dot{V}_x - \dot{\psi} V_y) \cos(\psi) - (\dot{V}_y + \dot{\psi} V_x) \sin(\psi) \\ \frac{F_y}{M} = (\dot{V}_x - \dot{\psi} V_y) \sin(\psi) - (\dot{V}_y + \dot{\psi} V_x) \cos(\psi) \\ \frac{M_z}{J_z} = \dot{r} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Pour un angle de rotation ψ petit : $\cos(\psi) \approx 1$, $\sin(\psi) \approx 0$ les expressions des accélérations au centre de gravité du véhicule s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \frac{F_x}{M_V} = (\dot{V}_x - r V_y) \\ \frac{F_y}{M_V} = (\dot{V}_y - r V_x) \\ \frac{M_z}{J_z} = \dot{r} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Suivant la 1^{er} loi de Newton sur l'axe latéral OY :

$$F_f^y + F_r^y + F_w = m(\dot{V}_y + V_x r) \quad (\text{II.6})$$

F_w est un coup de vent considéré appliqué sur une distance l_w (on néglige les autres forces résistantes aérodynamiques) l_w est la distance entre le centre de gravité et un autre point de l'axe $C_X X$ où on considère que le vent frappe.[33].

Les forces F_f^y et F_r^y sont les forces d'interaction entre les pneus et la route. Ces forces latérale dépendent des angles de glissement et elles sont définis comme suit :

$$\begin{cases} F_f^y = 2C_{yf} \alpha_f \\ F_r^y = 2C_{yr} \alpha_r \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

C_{yf} et C_{yr} sont les rigidités au glissement latéral des pneus avant et arrière[7].

Le glissement latéral (par rapport au plan de rotation de la roue) est évalué à travers l'angle de glissement (ou de dérive).

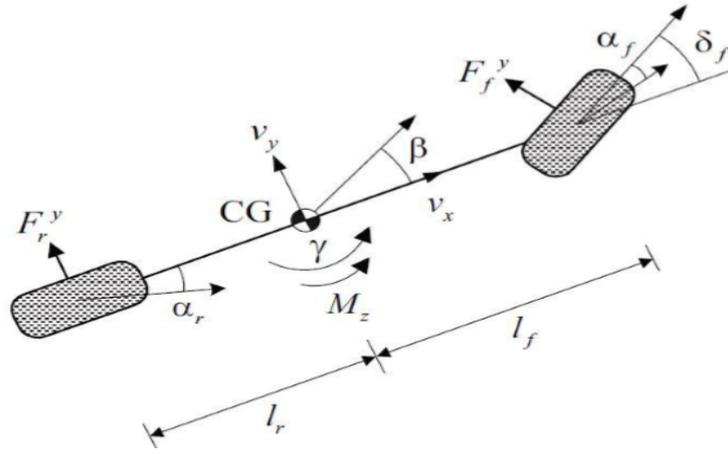


FIGURE II.4 – Angles de glissement dans un modèle de bicyclette[7]

En se basant sur le vecteur de vitesse du centre de gravité du véhicule $[v_x \ v_y \ r]$ et de ses paramètres géométriques, la compatibilité entre la vitesse et les angles de dérive s'écrit :

$$\begin{cases} \tan(\delta_f - \alpha_f) = \frac{l_f r + V_y}{V_x} \\ \tan(\alpha_f) = \frac{l_r r + V_y}{V_x} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Pour des petits angles de braquages :

$$\begin{cases} \alpha_f = \delta_f - \frac{l_f r + V_y}{V_x} \\ \alpha_r = \frac{l_r r + V_y}{V_x} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

En remplaçant (II.7),(II.9) en (II.6) :

$$\begin{aligned} 2C_f \alpha_f + 2C_r \alpha_r + F_w &= m(\dot{V}_y + V_x r) \\ \Rightarrow 2C_f \left(\delta_f - \frac{V_y + l_f r}{m V_x} \right) + 2C_r \frac{l_r r - V_y}{m V_x} + F_w &= m(\dot{V}_y + V_x r) \\ \Rightarrow \dot{V}_y &= -\frac{2(C_f + C_r)}{m V_x} V_y + \left(\frac{2(C_r l_r - C_f l_f)}{m V_x} - V_x \right) r + \frac{2C_f}{m} \delta_f + \frac{1}{m} F_w \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

Appliquons la 2^{eme} loi de Newton sur l'axe de lacet OZ :

$$\begin{aligned} F_f^y l_f - F_r^y l_r + l_w F_w &= J_z \dot{r} \\ \Rightarrow 2C_f \alpha_f l_f - 2C_r \alpha_r l_r + l_w F_w &= J_z \dot{r} \\ \Rightarrow J_z \dot{r} &= 2C_f l_f \left(\delta_f - \frac{V_y + l_f r}{V_x} \right) - 2C_r l_r \frac{l_r r - V_y}{V_x} + l_w F_w \\ \Rightarrow \dot{r} &= \frac{2(C_r l_r - C_f l_f)}{J_z V_x} V_y - \frac{2(C_f l_f^2 + C_r l_r^2)}{J_z V_x} r + \frac{2C_f l_f}{J_z} \delta_f + \frac{l_w}{J_z} F_w \end{aligned} \quad (\text{II.11})$$

J_z est le moment d'inertie du véhicule autour de centre de gravité.

En choisissant r et V_y comme variables d'état, le modèle bicyclette peut être écrit :

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_y \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\left(\frac{C_f+C_r}{mV_x}\right) & \frac{2(C_rl_r-C_fl_f) - V_x}{mV_x} \\ \frac{2(C_rl_r-C_fl_f)}{J_zV_x} & \frac{2(C_rl_r^2-C_fl_f^2)}{J_zv_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{2C_f l_f} \\ \frac{m}{J_z} \end{bmatrix} \delta_f \begin{bmatrix} \frac{1}{l_w} \\ \frac{m}{J_z} \end{bmatrix} F_w \quad (\text{II.12})$$

Ce modèle décrit seulement la dynamique de véhicule indépendamment de la référence de la route. Cette dernière, qui fournira le positionnement du véhicule sur la voie, sera donnée par un système de vision.

II.2.1 Positionnement du véhicule sur la voie

Pour décrire le mouvement du véhicule par rapport à la route, un système de vision est chargé de fournir les informations sur la position du véhicule et la géométrie de la route. Ce système fournit deux mesures (Figure II.5) :

- ψ_L : L'erreur sur l'angle de cap, à savoir la différence entre le cap de véhicule ψ et l'angle de la route ψ_d .
- y_L : l'écart latéral du véhicule par rapport au centre de voie, mesuré à une distance l_s en avant du véhicule

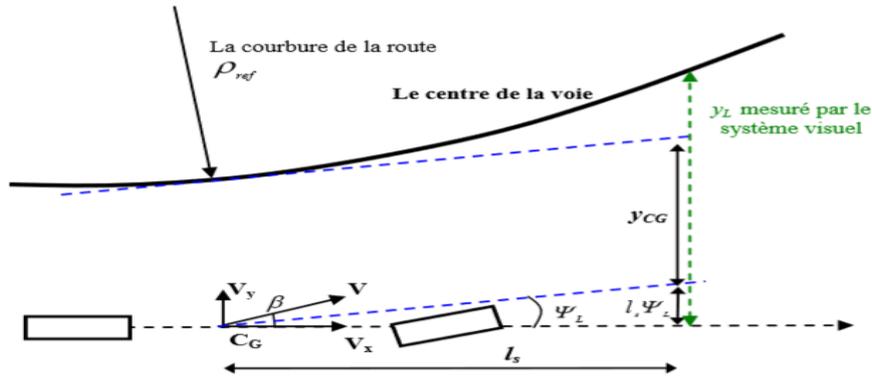


FIGURE II.5 – Positionnement du véhicule sur la voie

Selon [33] :

$$\begin{aligned} \psi_L = \psi - \psi_d &\Rightarrow \dot{\psi}_L = r - V_x \rho_{ref} \\ \dot{y}_L &= V_y + l_s r + \psi_L V_x \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

ρ_{ref} est la courbure de la route au centre de gravité $C_G \rho_{ref} = 1/R$ où R est le rayon de la route au centre de gravité du véhicule. Le « positionnement du véhicule sur la voie » peut être donc donné par le modèle suivant :

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_L \\ \dot{y}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & l_s & V_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ r \\ \psi_L \\ y_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -V_x \\ 0 \end{bmatrix} \rho_{ref} \quad (\text{II.14})$$

Quand y_L n'est pas directement mesurable, cet écart peut être approché par la projection de l'offset du centre de gravité du véhicule (y_{CG}) à une distance l_s (figure II.5) :

$$y_L = y_{CG} + l_s \psi_L \quad (\text{II.15})$$

Dans ce cas, on trouve que :

$$\dot{y}_L = V_y + \psi_L V_x + l_s r - l_s V_x \rho_{ref} \quad (\text{II.16})$$

Le modèle « positionnement sur la voie » deviendra :

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_L \\ \dot{y}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & l_s & V_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ r \\ \psi_L \\ y_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -V_x \\ -l_s V_x \end{bmatrix} \rho_{ref} \quad (\text{II.17})$$

Il reste à modéliser l'action qui impose le braquage des roues motrices et donc corrige la trajectoire du véhicule. Ceci se fera par un couple sur le volant transmis aux roues par la colonne de direction[33].

II.2.2 Système de direction assistée électrique

Il existe différents systèmes de direction assistée, dont certains conservent toujours un lien mécanique entre le volant et les roues, tandis que d'autres l'ont fait disparaître en utilisant la technologie appelée "by-wire" dans laquelle le système de contrôle agit directement sur un actionneur positionné au niveau de la roue. Les systèmes avec lien direct utilisent un moteur électrique pour ajouter un couple supplémentaire sur la colonne de direction (Figure I.15).[33]

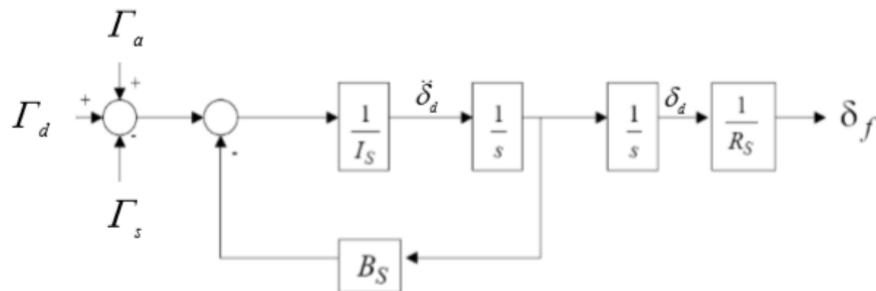


FIGURE II.6 – Modèle de la colonne de direction

Où Γ_d est le couple conducteur, Γ_a est le couple d'assistance, Γ_s est le couple d'auto-alignement, I_S est le moment d'inertie du volant. On passe à l'angle des roues par simple rapport de réduction R_s . B_S est le coefficient d'amortissement de la colonne de direction. δ_f est l'angle de braquage des roues avant, et δ_d est l'angle au volant. Selon la figure II.6, la colonne de direction représente un système « Mass-ressort-amortisseur » dont l'équation est :

$$I_S \ddot{\delta}_d = -B_S \dot{\delta}_d - \Gamma_S + \Gamma_d + \Gamma_a \quad (\text{II.18})$$

Le couple d'auto-alignement Γ_S peut-être donné par[15] :

$$\Gamma_s = -\frac{2K_m C_f \eta_t}{R_s} \left(\frac{V_y}{V_x} + \frac{l_f}{V_x} r - \delta_f \right) \quad (\text{II.19})$$

où K_m est le gain de direction manuelle, η_t est la largeur de contact pneu-sol. Cette modélisation concerne seulement le couple d'auto-alignement résultant de la dynamique du véhicule et néglige celui dû au revêtement de la route, car ce dernier est difficilement modélisable[33].

En remplaçant (II.19) en (II.18) on obtient :

$$\ddot{\delta}_d = \frac{T_{sb}}{I_s} V_y + \frac{T_{sr}}{I_s} r - \frac{T_{sb1}}{R_s I_s} \delta_d - \frac{B_s}{I_s} \dot{\delta}_d + \frac{1}{I_s} (\Gamma_a + \Gamma_d) \quad (\text{II.20})$$

où :

$$T_{sb} = \frac{2K_m C_f \eta_t}{R_s V_x}; \quad T_{sr} = \frac{2K_m C_f \eta_t l_f}{R_s V_x}; \quad T_{sb1} = \frac{2K_m C_f \eta_t}{R_s}$$

L'équation (III.20) donne la dynamique du système de direction en fonction des couples de commande appliqués au volant.

II.2.3 Modèle véhicule-route (VR)

Le VR est le modèle qui intègre l'évolution de la dynamique du véhicule (bicyclette), le système visuel et le système de direction. On obtient ce modèle sous la forme :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (\text{II.21})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_y \\ \dot{r} \\ \dot{\psi}_L \\ \dot{y}_L \\ \dot{\delta}_d \\ \dot{\ddot{\delta}}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & \frac{b_1}{R_s} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & \frac{b_2}{R_s} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & l_s & V_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{T_{sb}}{I_s} & \frac{T_{sr}}{I_s} & 0 & 0 & -\frac{T_{sb1}}{R_s I_s} & -\frac{B_s}{I_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ r \\ \psi_L \\ y_L \\ \delta_d \\ \dot{\delta}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & e_{11} & 0 \\ 0 & e_{22} & 0 \\ 0 & 0 & -V_x \\ 0 & 0 & -l_s V_x \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{I_s} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma_a + \Gamma_d \\ F_w \\ \rho_{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

où :

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= -\frac{2(C_f + C_r)}{mV_x}; \quad a_{12} = \frac{2(C_f l_f + C_r l_r)}{mV_x} - V_x; \quad a_{21} = \frac{(C_r l_r - 2(C_f l_f))}{J_z V_x}; \\
 a_{22} &= -\frac{2(C_r l_r^2 - 2(C_f l_f^2))}{J_z V_x} \\
 b_1 &= \frac{2C_f}{m}; \quad b_2 = \frac{2C_f l_f}{J_z}; \quad e_{11} = \frac{1}{m}; \quad e_{22} = \frac{l_w}{J_z} \\
 T_{sb} &= \frac{2K_m C_f \eta_t}{R_s V_x}; \quad T_{sr} = \frac{2K_m C_f \eta_t l_f}{R_s V_x}; \quad T_{sb1} = \frac{2K_m C_f \eta_t}{R_s}
 \end{aligned}$$

$$y = Cx + Du \quad (\text{II.23})$$

$$\begin{bmatrix} V_y \\ r \\ \psi_L \\ y_L \\ \delta_d \\ \dot{\delta}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ r \\ \psi_L \\ y_L \\ \delta_d \\ \dot{\delta}_d \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

La figure (II.7) présente schématiquement le vecteur d'état considérée, la commande et les perturbations.

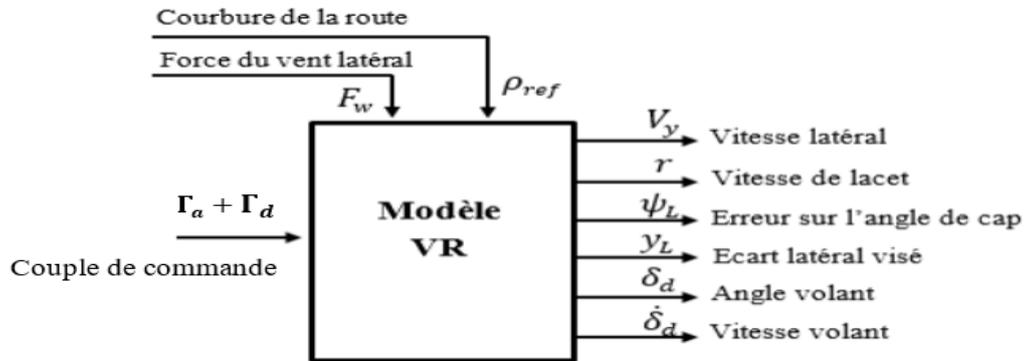


FIGURE II.7 – Modèle véhicule-route (VR)

II.3 Système de commande de l'accélération latérale

La commande de la dynamique latérale peut être réalisée en agissant sur l'accélération latérale. L'accélération transversale (latérale) du véhicule est exprimée comme suit[7] :

$$a_y = \dot{V}_y + rV_x \quad (\text{II.25})$$

En faisant l'approximation des petits angles :

$$\beta \in [0^\circ, 15^\circ] \quad \beta = V_y/V_x \quad V_x = V \cos \beta \simeq V$$

$$\cos \delta_f \simeq 1 \quad \sin \delta_f \simeq \delta_f \quad V_y = V \sin \beta \simeq V\beta$$

Une relation entre l'accélération transversale (latérale), la vitesse du véhicule et les vitesses de lacet et de dérive au centre de gravité sera déduite :

$$a_y = V(\dot{\beta} + r) \quad (\text{II.26})$$

Aussi en régime établi, la vitesse de dérive est nulle, l'accélération transversale peut s'écrire :

$$a_y = Vr = \frac{V^2}{R_c} \quad (\text{II.27})$$

II.4 Essais en boucle ouverte

Afin d'étudier le comportement dynamique des différents paramètres du véhicule étudié, des essais en boucle ouverte sans control seront effectués sous l'hypothèse d'une vitesse longitudinale constante ($V_x=15\text{m/s}$).

La trajectoire tracée par le véhicule a été obtenue en intégrant les variables d'états dans le repère (X,Y). Mais avant cela, une transformation du repère véhicule (x, y) vers le repère inertiel (X, Y) était nécessaire car les grandeurs sont mesurées dans le repère associé au véhicule.

a- Essai 1 : Le cas d'un mouvement circulaire

On remarque que l'application d'un couple en échelon sur le volant à l'instant $t=5.5$ s, impose un angle de braquage (qui se stabilise à la valeur 0.08 rad) sur les roues ce qui conduit le véhicule à tracer une trajectoire circulaire (Figure II.8).

Sur la même figure on présente l'évolution de la vitesse de lacet et l'accélération latérale qui apparaissent immédiatement lors l'application de la consigne en couple.

La vitesse latérale a été également présentée, on remarque qu'elle est sensible à l'application du couple car cette dernière est liée à l'angle du braquage résultant d'une action sur le volant.

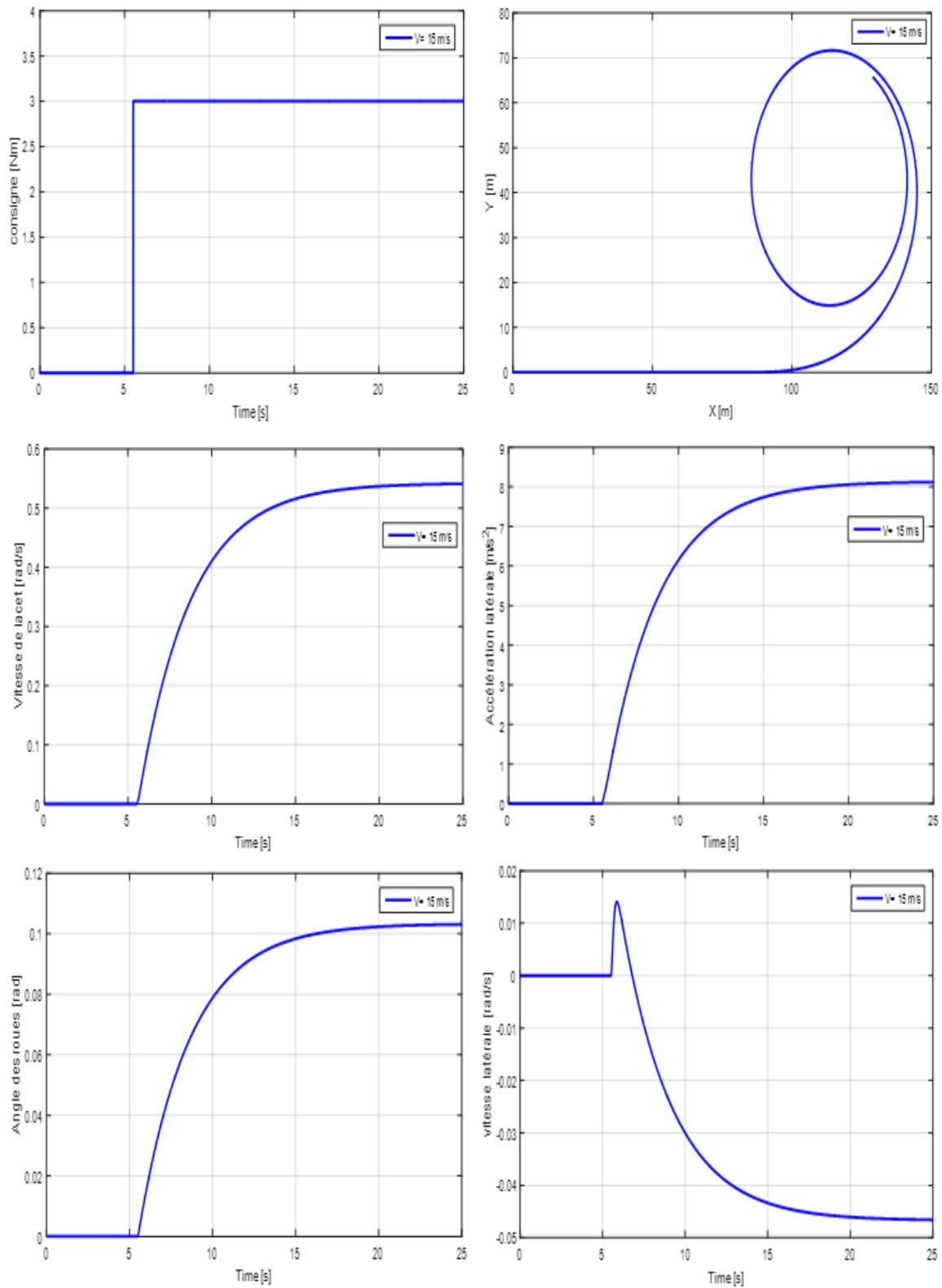


FIGURE II.8 – Le cas d'un mouvement circulaire

b- Essai 2 : Le cas d'un mouvement en deux virages

Cet essai est le cas de passage du véhicule par deux virages. il est appliqué en supposant que le véhicule suit un chemin droit puis à l'instant 5.5s, deux virages, l'un vers la gauche et l'autre vers la droite sont imposés au véhicule par la consigne en couple. La figure (II.9) présente le couple volant dont la valeur maximale est de (± 7 Nm). Le véhicule tourne vers la gauche à partir de l'instant (temps = 5.5 s) et quand la consigne en couple atteint sa valeur maximale à l'instant (temps = 5.5 s), elle y est maintenue pendant 5 seconds puis elle est ramenée à zéro à l'instant (temps = 10.5 s).

Ensuite, la voiture est braquée vers la droite à partir de l'instant (temps = 15.5 s) pendant 5 seconds puis elle est remise de nouveau à sa trajectoire à l'instant (temps = 20.5 s). On remarque d'après la figure (II.9) que lors du passage par des virages, le véhicule se manifeste par une variation des coordonnées de position dans le plan (X, Y).

D'après la même figure, il est intéressant de signaler que la vitesse angulaire, l'accélération latérale, angle des roues varient suivant la consigne en couple, ils ont la même allure seule l'amplitude varie.

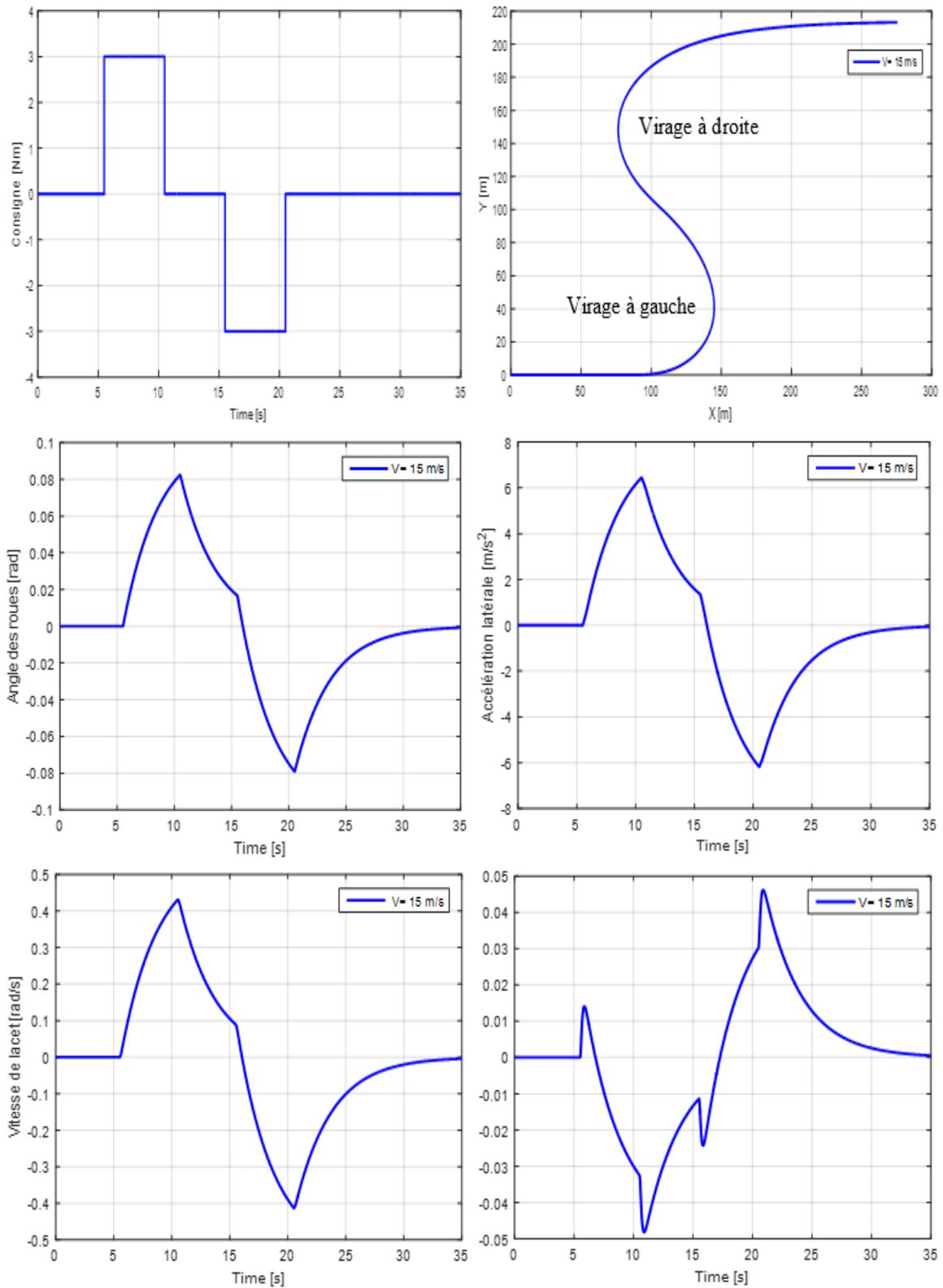


FIGURE II.9 – Le cas d'un mouvement en deux virages

II.5 Synthèse de la commande latérale

L'objectif de la commande latérale est de forcer le véhicule à suivre une trajectoire de référence. Pour accomplir ce but, un système de commande de l'accélération latérale est nécessaire dont cette l'accélération doit atteindre une valeur de référence déjà définie dans la partie théorique.

II.5.1 Synthèse d'un régulateur PI pour la commande latérale du véhicule

Dans cette partie on s'intéresse à la commande linéaire par PI de l'accélération latérale du VE en utilisant le modèle à deux degrés de liberté constitué de la dynamique latérale et de lacet (Vitesse longitudinale supposé constant) comme indique la figure II.10 :

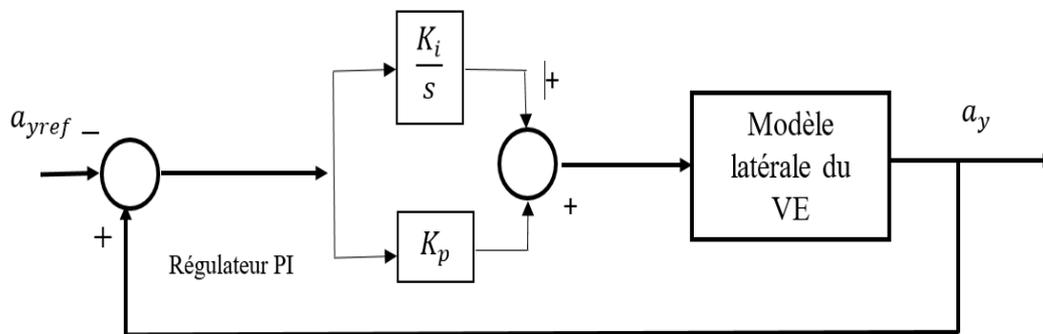


FIGURE II.10 – Regulateure PI

Avec : $a_{yref} = V^2/R_c$

Le régulateur proportionnel intégral PI comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa propre consigne.

II.5.2 Détermination des paramètres du régulateur PI

Il existe dans la littérature, de nombreuses méthodes permettant de déterminer les paramètres du régulateur PID, qui peuvent être divisées en deux catégories : méthodes analytiques et méthodes empiriques. Les méthodes analytiques se sont les techniques de calcul basées sur le modèle du procédé à commander, telles que, la commande optimale LQG, la commande H_∞ , la commande d'ordre fractionnaire et la commande à modèle interne... ect.

La méthode de Ziegler –Nichols est la méthode la plus connue et la plus utilisée dans le domaine industriel, Cette méthode sera adoptée pour la détermination des paramètres

de notre régulateur K_p et K_i du régulateurs PI .

II.5.3 La méthode de Ziegler-Nichols

En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux approches expérimentales destinées à ajuster rapidement les paramètres des régulateurs à structure Proportionnel (P), Proportionnel-Intégral (PI) et Proportionnel-Intégral-Dérivateur (PID), la première nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle du système en boucle ouverte, alors que la deuxième demande d'amener le système en boucle fermée à sa limite de stabilité[11].

a- Réponse indicielle en boucle ouverte

Cette méthode est basée sur les deux paramètres ' a ' (pente) et ' T_c ' (seuil) de la réponse indicielle issue d'un essai en boucle ouverte (BO), comme le montre les figures (II.11) et (II.12) [25] :

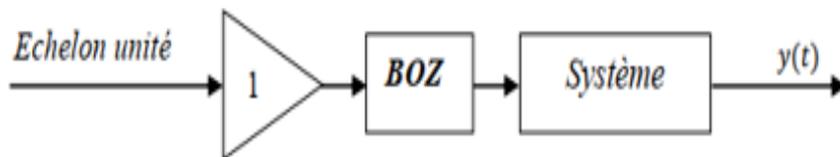


FIGURE II.11 – Essai de Ziegler-Nichols en boucle ouvert

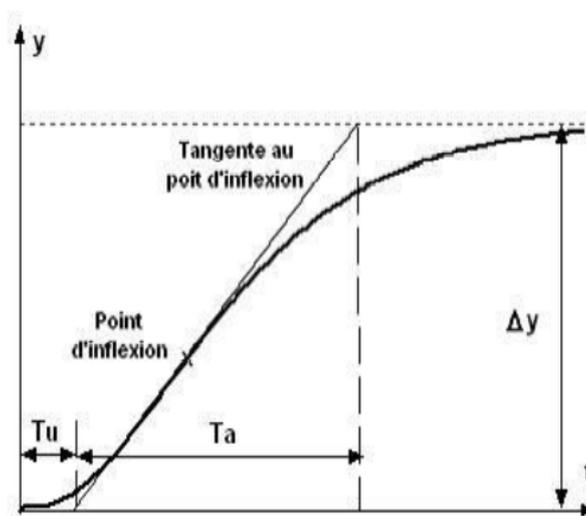


FIGURE II.12 – Caractérisation de la réponse indicielle dans la méthode Ziegler-Nichols en BO

Le tableau suivant montre les expressions empiriques des paramètres des contrôleurs P/PI/PID proposées par Ziegler-Nichols en boucle ouverte :

Type	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{K T_u}{T_a}$		
PI	$\frac{0.9 T_u}{K T_u}$	$3 T_u$	
PID	$\frac{1.2 T_u}{K T_u}$	$2 T_u$	$0.5 T_u$

TABLE II.1 – Relations de réglage préconisé par la méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte [11]

b- Réponse indicielle en boucle fermée

Cette méthode est caractérisée par les deux paramètres ' G_{rc} ' : qui est le gain mettant le système bouclé en oscillation entretenue et ' T_{osc} ' : qui est la période de l'oscillation entretenue. Le principe de cette méthode consiste à augmenter progressivement le gain ' G_{rc} ' d'un correcteur proportionnel pur jusqu'à l'obtention d'une oscillation entretenue, comme le montre la figure (II.13)[25].

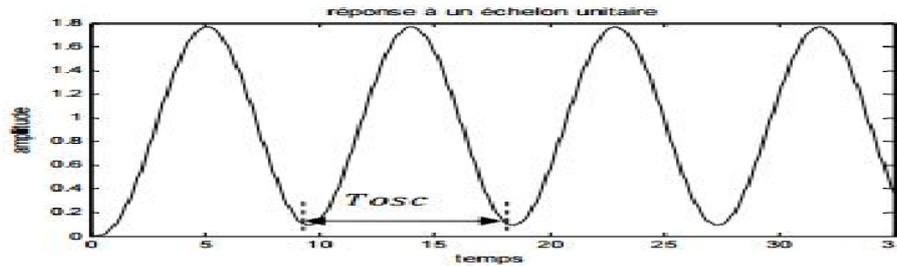


FIGURE II.13 – Caractérisation de la réponse indicielle dans la méthode Ziegler-Nichols en BF.

Les paramètres de réglage des contrôleurs P/PI/PID en fonction des paramètres relevés sur le système en boucle fermée (BF), sont montrés dans le tableau suivant :

Correcteurs et Actions	P	PI	PID Mixt
K_p	$G_{rc}/2$	$G_{rc}/2.2$	$G_{rc}/1.7$
T_i	T_i maxi	$T_{osc}/1.2$	$T_{osc}/2$
T_d	0	0	$T_{osc}/8$

TABLE II.2 – Paramètres des correcteurs à partir de la méthode de pompage et de la BF pour la méthode de Ziegler Nichols [11]

II.6 Résultat de simulation

Les tests sont effectués sous les mêmes conditions de simulation des tests précédents.

a- Test de suivi de trajectoire

Durant ce test le couple conducteur est supposé nulle donc la conduite assistée est en mode conduite autonome aussi la perturbation du vent sera négligée.

Le but est de vérifier le suivi de trajectoire pendant la conduite autonome avec paramètres connus. L'accélération latérale de référence vaut $\pm 5\text{m/s}^2$, la vitesse longitudinale est fixée à 15 m/s et le rayon de courbure choisie $R_c = \pm 37\text{m}$.

Sur la figure (II.14), on présente la trajectoire de référence et la trajectoire du véhicule parcourue. On remarque que le véhicule suit parfaitement sa trajectoire de référence, aussi angle des roues se varie selon la trajectoire du véhicule parcourue (virage à droite ou à gauche). Le couple de commande varie entre $\pm 10\text{ Nm}$ suivant le virage parcouru

La dynamique de la vitesse de lacet est aussi présentée. Cette variable a la même allure que celle de l'accélération latérale car ces deux variables sont liées. Donc, on peut contrôler indirectement la vitesse de lacet en agissant sur le réglage de l'accélération latérale. On remarque aussi sur la même figure que l'écart latérale est très faible que signifie que le régulateur PI est performant.

b- Test de robustesse à une vitesse élevée

Le but de ce test est de vérifier la robustesse du régulateur PI pendant une conduite à vitesse élevée (20m/s) en conservant la même valeur du rayon de courbure (37 m).

On remarque d'après la figure (II.15) que malgré le changement de la vitesse, le modèle contrôlé est faiblement influencé. Cependant, cela nécessite un couple volant plus important pour atteindre la trajectoire de référence imposée.

Les autres réponses pris les mêmes allures comme celles de test précédent mais avec des amplitudes importantes.

c- Test de robustesse par rapport au changement de rayon de courbure

Dans ce test (Figure II.16) le rayon de courbure a été changé à la valeur de 50 m. Le véhicule passera les deux virages à une vitesse longitudinale constant de 15 m/s.

On remarque qu'il y a une meilleure poursuite de trajectoire malgré le changement du rayon de courbure. Aussi ce rayon de courbure important nécessite couple de commande assez petit.

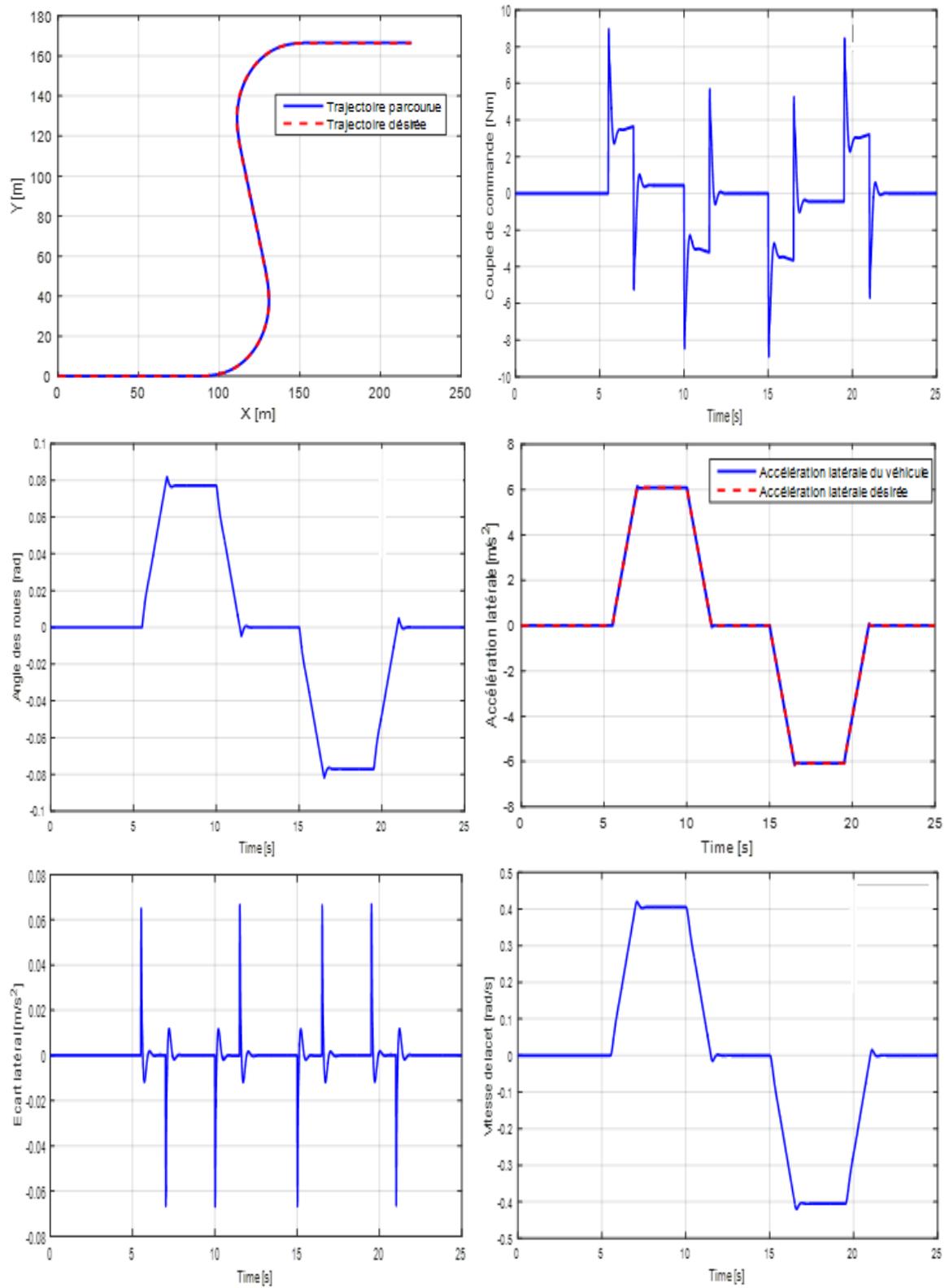


FIGURE II.14 – Test de suivi de trajectoire

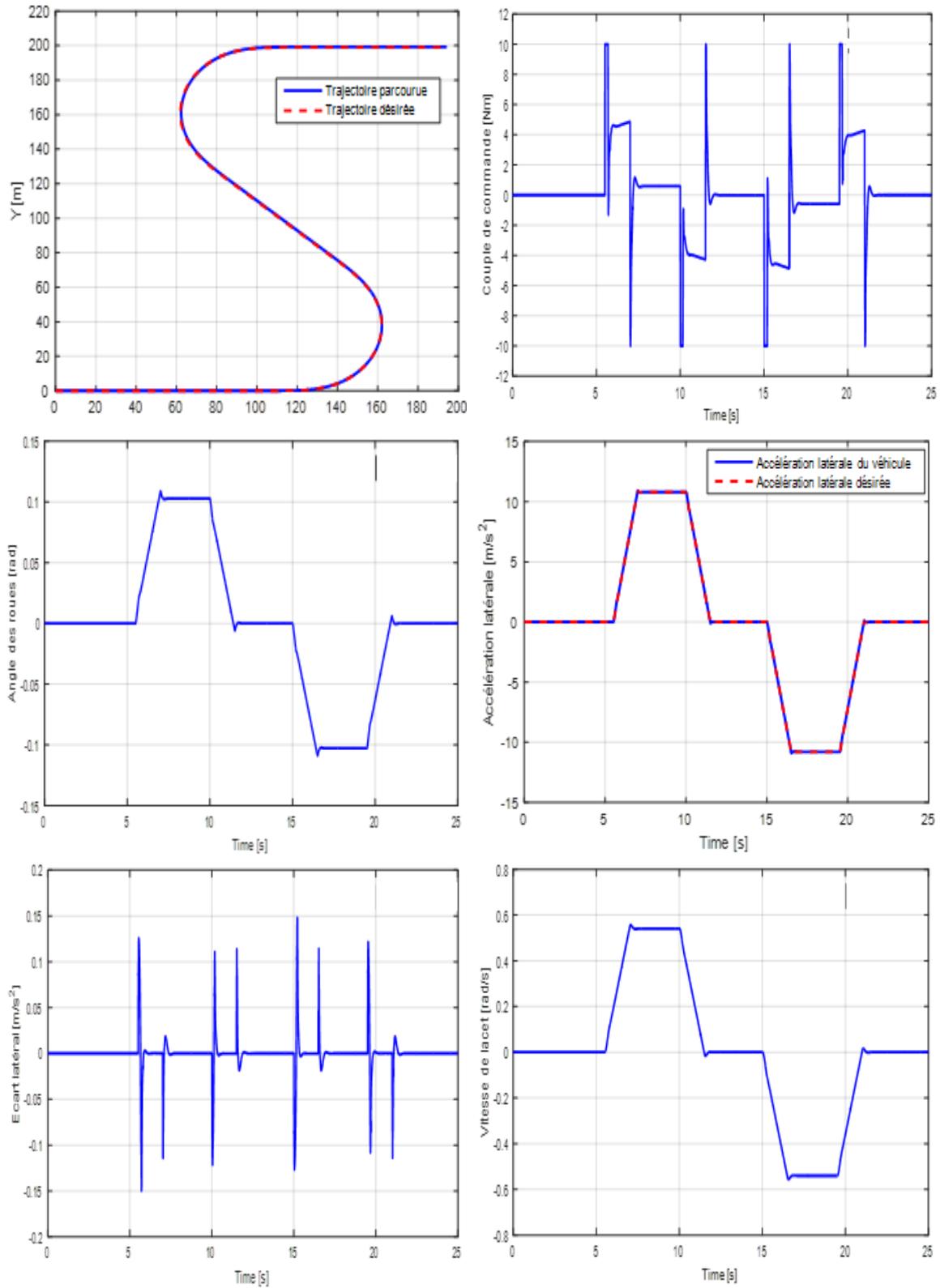


FIGURE II.15 – Test de robustesse à une vitesse élevée

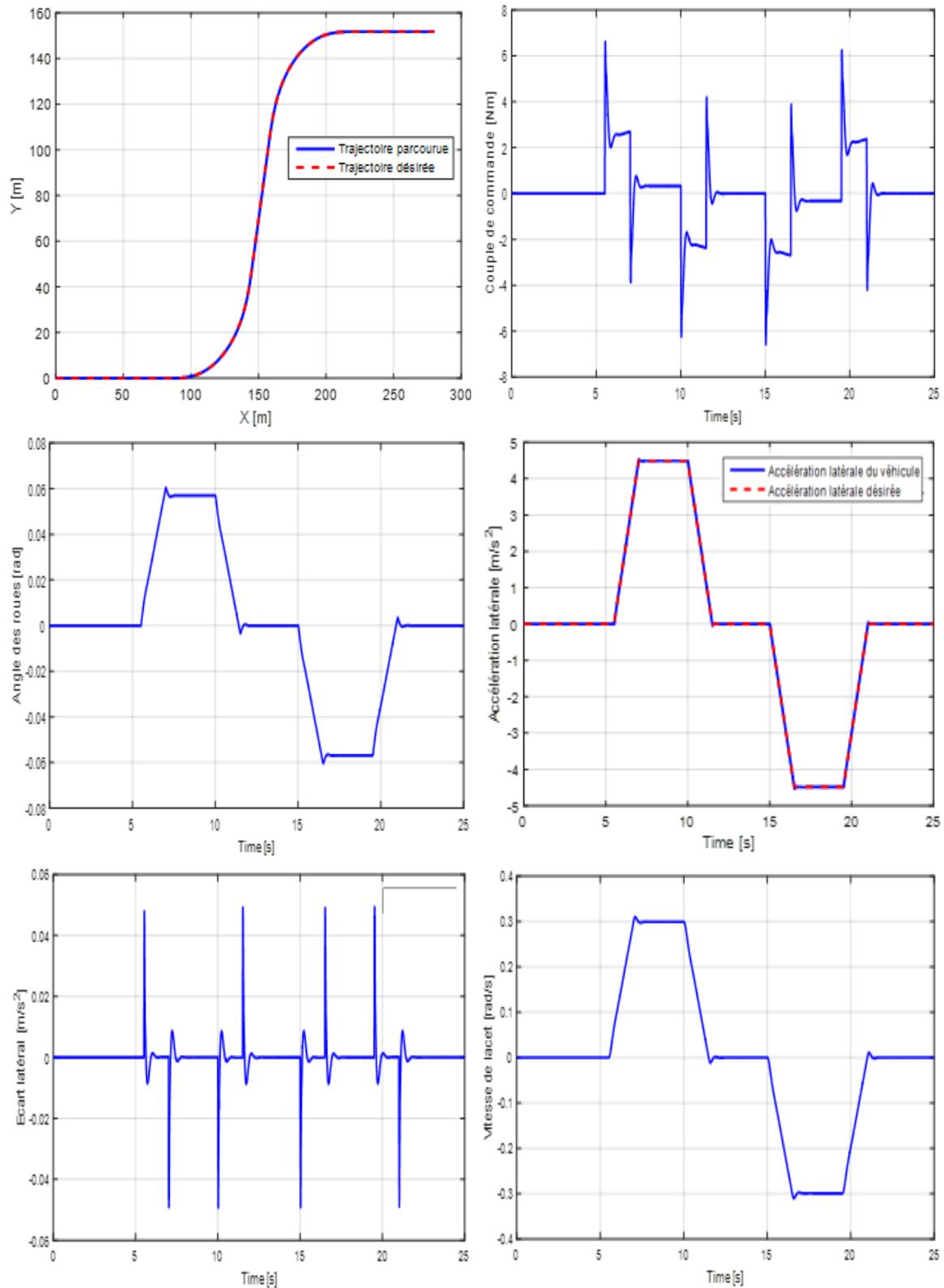


FIGURE II.16 – Test de robustesse par rapport au changement de rayon de courbure

d- Test de robustesse par rapport aux incertitudes paramétriques du véhicule

1- Incertitude sur le coefficient de rigidité du pneu

On présente sur la figure (II.17) la trajectoire du véhicule après avoir ajouté une erreur de 25% sur les rigidités des pneus avant et arrière. Sur la même figure, on présente le couple de commande qui est une entrée de commande pour le système.

On remarque que la trajectoire et les autres réponses sont influencée par l'introduction des incertitudes sur les rigidités des pneus ce qui confirme la sensibilité du régulateur PI synthétisé par rapport au changement paramétrique. Aussi, l'incertitude sur ce paramètre nécessite couple de commande important.

2- Incertitudes sur la masse totale du véhicule

La masse du véhicule peut varier ou être mal estimée. Elle dépend du nombre de personnes dans le véhicule. Pour une vitesse longitudinale de 15m/s et avec une variation de la masse totale de véhicule (variation à 20%) On remarque sur la figure (II.18) que le véhicule suit bien sa trajectoire. Aucun changement considérable sur l'autre réponses.

Par contre la réponse en couple de commande est complètement changé ou remarque que lors le passage par le virage et avec une masse supplémentaire ajoutée à la masse réel du véhicule le couple du volant est très imposant et maintenu à une valeur fixe jusqu'à la sortie du virage.

e- Test en présence d'une perturbation extérieur

Ce test considère une perturbation de vent d'amplitude 1500N introduite a $t=5.5s$ pendant 5s. Sur la figure (II.19), On remarque que le véhicule suit bien sa trajectoire de référence avec de faibles erreurs; cependant l'écart latérale est plus important.il est important de signaler que le coups du vents appliqué a perturbé les autres réponses et que couple de commande a changé d'allure. Ce qui signifie que le régulateur PI est sensible aux perturbations extérieur.

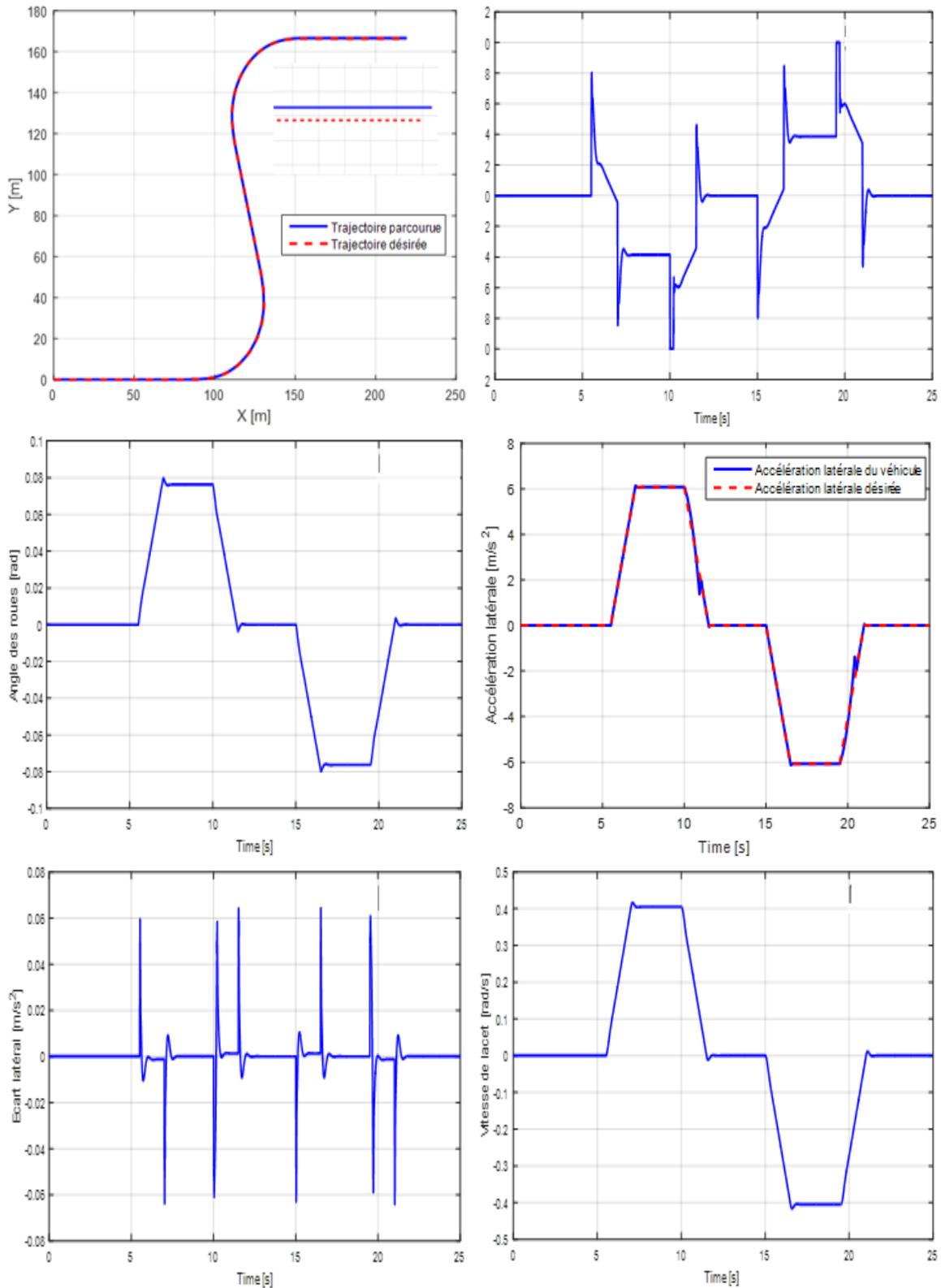


FIGURE II.17 – Incertitude sur le coefficient de rigidité du pneu

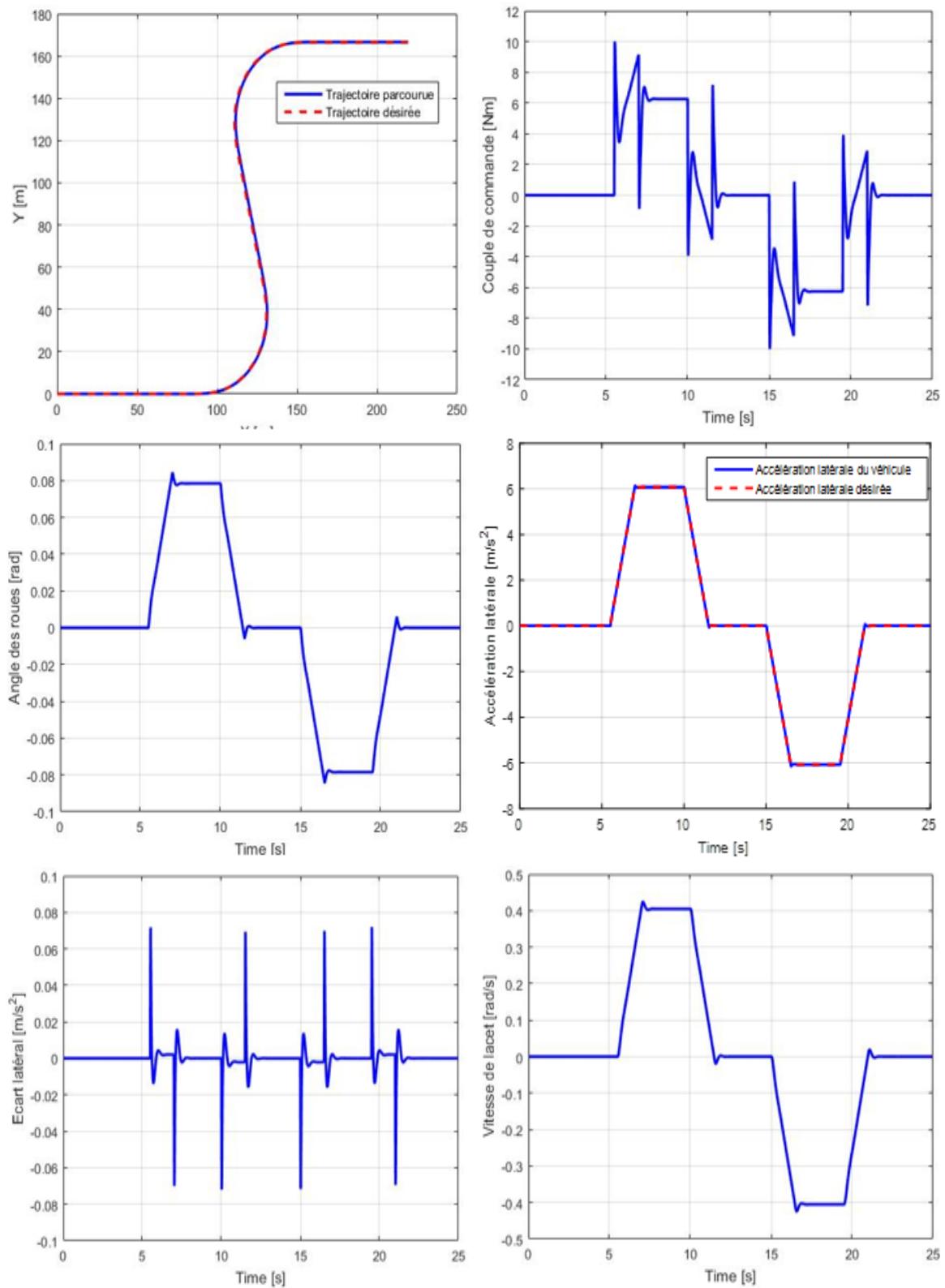


FIGURE II.18 – Incertitudes sur la masse totale du véhicule

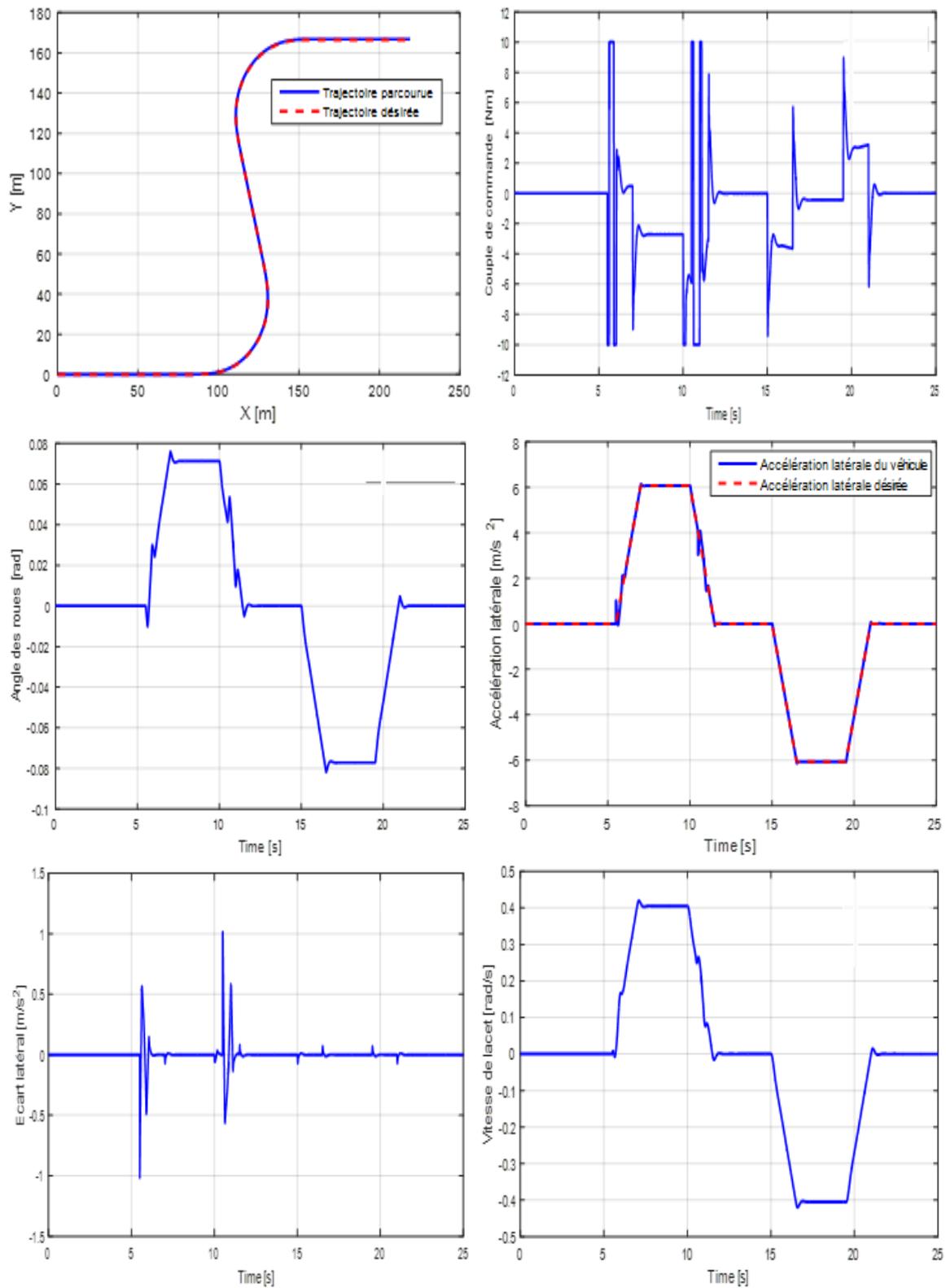


FIGURE II.19 – Test en présence d'une perturbation extérieur

II.7 Conclusion

Cette partie a présenté la modélisation de la dynamique latérale d'un VE à partir d'une étude dynamique et une étude cinématique du véhicule. Les résultats de simulation ont montré des performances satisfaisantes, par contre la commande synthétisée par PI est sensible par rapport aux variations de la charge et aux incertitudes sur les paramètres du véhicule.

La synthèse du réglage par des régulateur PI, a été effectuée après linéarisation du système (en considérant une vitesse longitudinale constante). Cependant, le système réel est non linéaire et il est incertain.

Afin d'améliorer des performances telles que la rapidité et la précision et dans le but d'avoir un régulateur robuste vis-à-vis les changements paramétriques et les perturbations, un recours à des méthodes de commandes non linéaires s'avère nécessaire. On procédera dans le chapitre suivant à la synthèse de la commande par mode glissant appliquée pour la commande de la dynamique latérale du VE.

Chapitre III

COMMANDE NON LINÉAIRE PAR MODE GLISSANT DE LA DYNAMIQUE LATÉRALE DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE

III.1 Introduction

Dans la commande des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, les lois de commande classique peuvent être insuffisantes car elles sont non robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques des systèmes sont strictes. On doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux non linéarités.

La commande par mode de glissement fait partie de la famille des contrôleurs à structure variable, c.à.d. des commandes commutant entre plusieurs lois de commande différentes.

L'importance des contrôleurs par mode glissant réside dans : la grande précision, la réponse dynamique rapide, la stabilité, la simplicité de la conception et l'implantation, et la robustesse vis-à-vis la variation des paramètres internes ou externes [22].

Dans ce chapitre la stratégies la commande par mode glissant sera applique pour la commande de la dynamique latérale du VE.

La théorie des modes glissant sera détaillée en premier en présentant son principe de de fonctionnement, sa conception et ses limitations. Une synthèse de cette commande pour l'asservissement de l'accélération latérale de VE sera présentée en appliquant commande mode glissant a surface augmente. Les résultats de la simulation font l'objet d'une étude comparative entre le régulateur linéaire PI synthétisé dans le chapitre précédant et le régulateur mode glissant.

III.2 Commande par mode glissant

Les premiers travaux concernant les systèmes de commande à structure variable en mode de glissement ont été proposés et élaborés au début des années 50 par Emelyanov. Par la suite, ces travaux ont été repris ailleurs, soit pour compléter l'étude théorique soit pour étudier quelques applications possibles, en particulier dans le domaine des entraînements réglés. Cependant, ce n'est qu'à partir des années 80 que la commande par mode de glissement est devenue intéressante et attractive[18].

La commande par mode glissant est une classe de la commande à structure variable, elle est efficace et robuste pour les systèmes linéaires et non linéaires. La tâche principale de la commande par mode glissant, est de fournir une surface de commutation, selon des lois d'existence, de convergence et de stabilité[23].

Le principe de la commande à modes glissants consiste à ramener la trajectoire d'état à évoluer vers une surface de glissement et la faire commuter autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre à l'aide d'éléments de commutation discontinue. La surface considérée, correspondant aux dynamiques souhaitées, est alors désignée comme étant la surface de glissement et la commande garantit que le point représentatif du système atteint l'hyper-surface en un temps fini[7].

III.2.1 Systèmes à structure variable

Le terme « système à structure variable » apparaît à cause de la structure qui change d'une façon discontinue entre deux ou plusieurs structures. L'étude de tel système est très bénéfique notamment en mécanique, en physique, et en électricité... [20].

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement, il est caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à l'autre à tout instant. De plus un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure[39].

Le système à structure variable admet une représentation par des équations différentielles du type :

$$\dot{x} = \begin{cases} f_1(X) & \text{si la condition 1 est vérifiée.} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n(X) & \text{si la condition n est vérifiée.} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Où f_i sont des fonctions appartenant à un ensemble de sous systèmes[7].

III.3 Théorie des modes glissants

La théorie des systèmes à structure variable (sliding mode), est une technique de commande non linéaire, elle est caractérisée par la discontinuité de la commande aux passages par une surface de commutation appelée surface de glissement. La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre. D'où le phénomène de glissement figure . En résumé, une commande par régime glissant est divisée en deux parties [31] :

- Détermination d'une région d'espace d'état telle qu'une fois que le système se trouve dans cette région, il ait le comportement désiré.
- Définition d'une loi de commande qui conduit le système jusqu'à cette région de l'espace d'état.

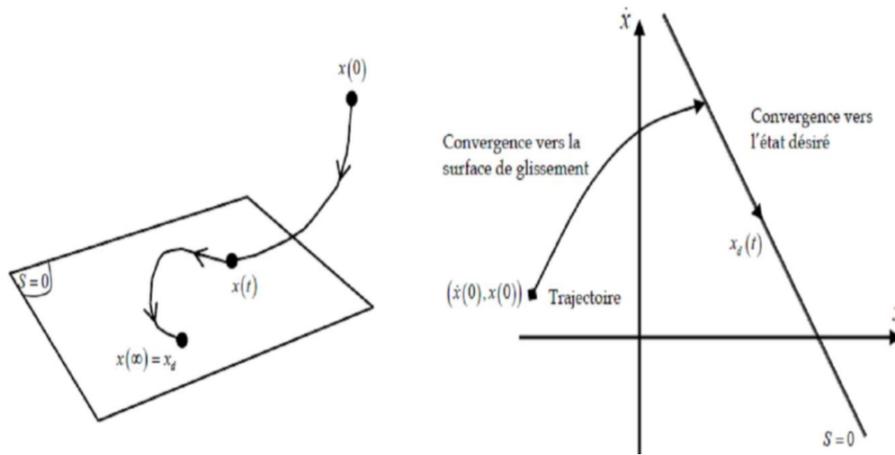


FIGURE III.1 – Convergence du système glissant

Dans la littérature nous trouvons deux types de modes glissants d'ordre 1 idéaux et réels.

- **mode glissant idéal** : En théorie, l'organe de commutation est supposé insensible aux bruits. et la trajectoire en régime glissant décrit parfaitement l'équation $S(x)=0$. Le régime glissant idéal à une oscillation de fréquence infinie et d'amplitude nulle, le point représentatif de l'évolution du système glisse parfaitement sur l'hyper surface de commutation S .

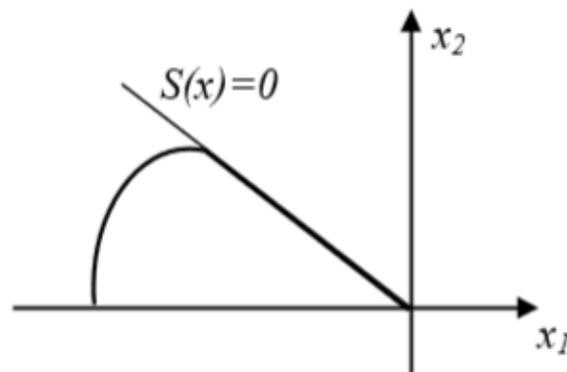


FIGURE III.2 – Glissement idéal

- **mode glissant réel** : En pratique l'organe de commutation est réalisé à partir de relais qui présente des imperfections comme les retards de commutations, dans ce cas, la trajectoire de phase du régime glissant reste au voisinage de la surface de commutation donnant naissance à des oscillations indésirables qui éliminent la précision du système et néanmoins sa stabilité.

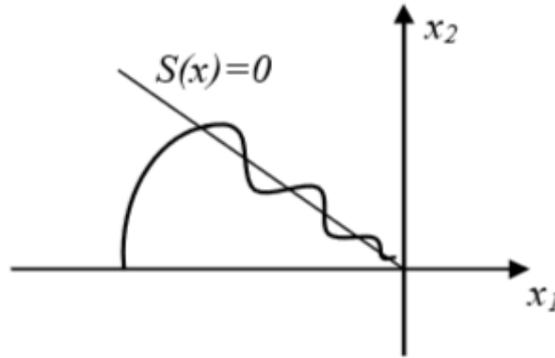


FIGURE III.3 – Glissement réel

III.3.1 Objectif de la commande par mode glissant

L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels[35] :

- Synthétiser une surface $S(x,t)$, telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité.
- Déterminer une loi de commande (commutation) $U(x,t)$ qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

III.3.2 Principe de la commande par mode glissant

Un système à structure variable (VSS) est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure[35].

III.4 Conception de la commande par mode glissant

La conception de la commande par mode de glissement prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche. qui s'effectue principalement en trois étapes complémentaires définies par[31] :

- Choix des surfaces de glissement.
- Définition des conditions d'existence et de convergence du régime glissant.
- Détermination de la loi de commande.

III.4.1 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de surfaces, mais également leur forme, en fonction de l'application et de l'objectif visé. En général, pour un système d'état décrit par l'équation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, t)u(t) \\ y = h(x) \quad y \in R^m \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Slotine a proposé une forme générale qui consiste à définir une fonction scalaire des surfaces de glissement dans le plan de phase dans le but d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de consigne S^d cette fonction est donnée par l'équation [18] :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_x\right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$e(x)$: écart de la variable à réguler.

λ : une constante positive qui interprète la bande passante de contrôle désirée.

r : degré relatif, c'est le plus petit entier positif représentant le nombre de fois qu'il faut dériver afin de faire apparaître la commande.

Ou :

$$e(x) = x_f - x \quad (\text{III.4})$$

Pour $r=1$:

$$S(x) = e(x) \quad (\text{III.5})$$

Pour $r=2$:

$$S(x) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x) \quad (\text{III.6})$$

Pour $r=3$:

$$S(x) = \lambda_x^2 e(x) + 2\lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x) \quad (\text{III.7})$$

On prend $r=2$

La difficulté revient à un problème de poursuite de trajectoire dont l'objectif est de garder $S(x)$ à zéro.

Ceci est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart en respectant la condition de convergence.

La linéarisation exacte de l'écart a pour but de forcer la dynamique de l'écart (référence sortie) à être une dynamique d'un système linéaire autonome d'ordre « r » (Figure III.4)[18].

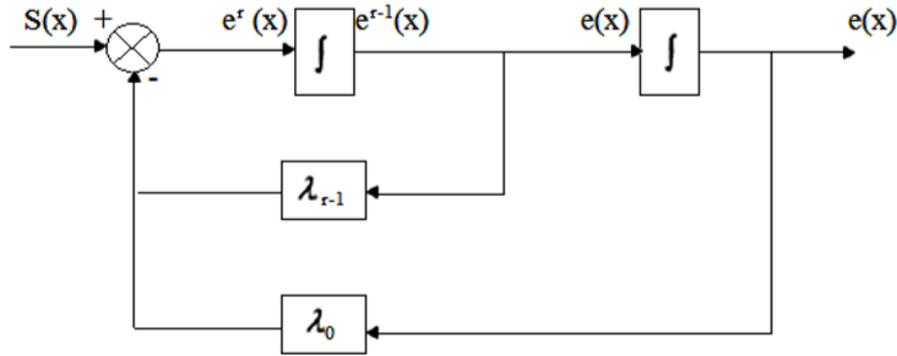


FIGURE III.4 – Linéarisation exacte de l'écart

III.4.2 Condition de convergence

On réalise la condition de glissement afin de contraindre les points représentatifs de la trajectoire à rester sur la surface de glissement. Nous retenons dans la littérature deux conditions, celle-ci correspondent au mode de convergence de l'état du système[18].

a- Fonction direct de commutation (convergence)

C'est la première condition de convergence, elle a été proposée par **EMTLIANOV** et **UTKTN** [18]. Elle est donnée par :

$$\dot{S}(x) > 0 \text{ lorsq } S(x) < 0 \quad \dot{S}(x) < 0 \text{ lorsq } S(x) > 0$$

A partir de ces deux inégalités on peut formuler la condition suivante :

$$\dot{S}(x)S(x) < 0 \quad (\text{III.8})$$

b- Fonction de Lyapunov

Il s'agit de choisir une fonction candidate de Lyapunov $V(x) > 0$ (fonction scalaire positive) pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{V}(x) < 0$.

En définissant par exemple une fonction candidate de Lyapunov pour le système comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2}S^2(x) \quad (\text{III.9})$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{V}(x) = \dot{S}(x)S(x) \quad (\text{III.10})$$

Pour que la fonction candidate de Lyapunov puisse décroître, il suffit d'assurer que (III.7)

Cette approche est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de la robustesse et de la stabilité des systèmes non linéaires[31].

III.4.3 Détermination de la loi de commande

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique du système est indépendante de la loi de commande qui n'a pour but que de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface), c'est pour cette raison que la surface est déterminée indépendamment de la commande. Maintenant, il reste à déterminer la condition nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence des modes glissants.

L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux côtés. De ce fait, si cette commande discontinue est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée.

La partie continue nous permet de réduire autant que nous voulons l'amplitude de la partie discontinue. En présence d'une perturbation, la partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité.

Par conséquent, la structure d'un contrôleur mode glissant comporte deux parties ; une première concernant la linéarisation exacte U_{eq} et une deuxième U_n dite stabilisante [7].

$$U = U_{eq} + U_n \quad (\text{III.11})$$

U_{eq} Correspond à la commande équivalente proposée par Filipov et Utkin .Cette commande est considérée comme la plus directe et la plus simple. Elle est utilisée lorsque l'état du système entre dans le mode de glissement et pour but de compenser les dynamiques indésirables. Cette commande est calculée en reconnaissant que le comportement du système durant le mode de glissement est décrit par $\dot{S}(x)=0$.

La commande discrète U_n est introduite pour satisfaire la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système .

La commande équivalente peut être interprétée comme la valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre U_{max} et U_{min} [7].

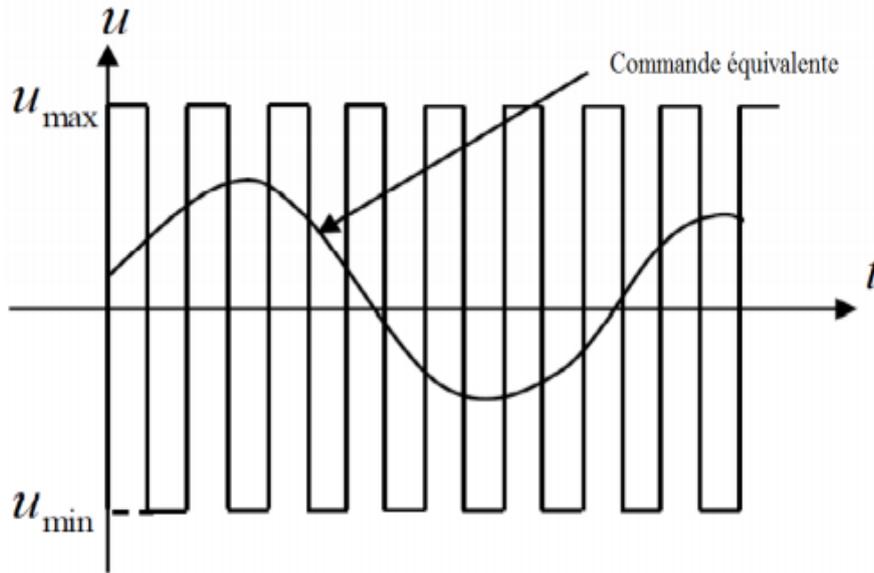


FIGURE III.5 – Représentation de la commande équivalente

Comme exemple d'application, on considère un système d'état défini par l'équation (III.2). Le but est de chercher une expression de la commande u .

La dérivée de la surface est

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{dS}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (\text{III.12})$$

Par substitution, nous obtenons :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dx}(f(x, t) + g(x, t)u_{eq}(t)) + \frac{dS}{dx}g(x, t)u_n \quad (\text{III.13})$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle (car la surface est égale à zéro). Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{cases} u_{eq}(t) = -\left(\frac{dS}{dx}g(x, t)\right)^{-1}\left(\frac{dS}{dx}f(x, t)\right) \\ u_n = 0 \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que :

$$\frac{dS}{dx}g(x, t) \neq 0 \quad (\text{III.15})$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme u_{eq} par sa valeur (III.14) dans l'équation (III.13), nous obtenons une nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dx}(g(x, t)u_n) \quad (\text{III.16})$$

Et par la suite, la condition d'attractivité devient :

$$S(x) \frac{dS}{dx}(g(x, t)u_n) < 0 \quad (\text{III.17})$$

Afin de satisfaire la condition, le signe de u_n doit être opposé à celui de $S(x) \frac{dS}{dx}(g(x, t)u_n)$ solution la plus simple est de choisir u_n sous la forme de relais (Figure III.6). Dans ce cas, la commande s'écrit comme suit :

$$u_n = k \text{sign}(S(x)) \quad (\text{III.18})$$

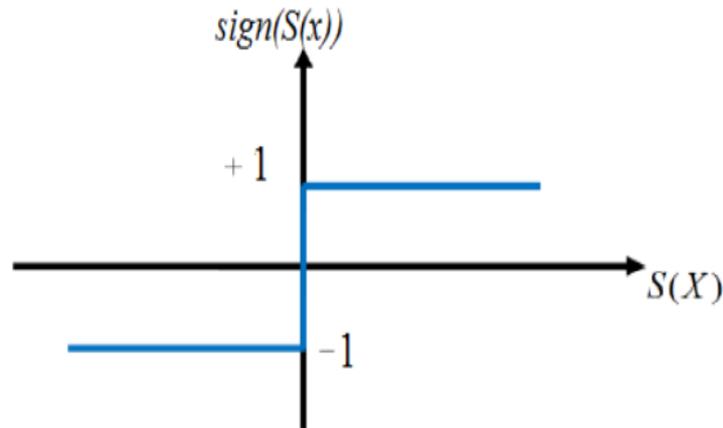


FIGURE III.6 – La fonction ‘sign’

Avec k est le gain de commande, choisi suffisamment grand pour compenser l'écart dynamique entre le système réel et de référence (donné par la surface de glissement), et les perturbations du système[7].

Si le gain k est très petit, le temps de réponse sera long, si k est très grand, le temps de réponse sera rapide mais des oscillations indésirables risquent d'apparaître (couramment appelées Chattering en anglais) sur les réponses en régime permanent.

III.5 Elimination du phénomène du broutement (Chattering)

Le phénomène de **Chattering** est le principal inconvénient de la commande par mode de glissement. Il est dû d'une part à l'imperfection des éléments de commutation ou des limites technologiques et physiques, tels que les retards au niveau des commutations ou des comportements hystérésis, qui peuvent exciter des dynamiques négligées en haute fréquence. Le phénomène de **Chattering** est un phénomène indésirable car il ajoute au spectre de la commande des composantes de fréquence théoriquement infinie. Une telle

commande qui est très difficile à réaliser en pratique, peut endommager les actionneurs par les sollicitations trop fréquentes[18].

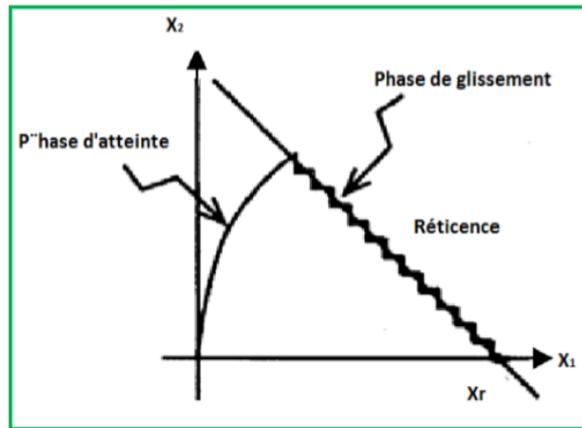


FIGURE III.7 – Phénomène de Chattering dans un plan bidimensionnel

Dans le but de réduire ces oscillations, plusieurs solutions ont été apportées comme par exemple : remplacer la fonction «sign» par une fonction de saturation caractérisée par un ou deux seuils (atténuation des amplitudes des ondulations) (Figure III.8).

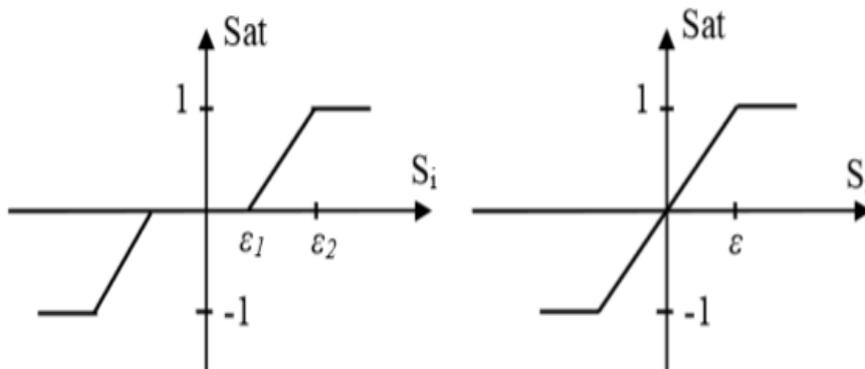


FIGURE III.8 – Fonction SAT avec un seuil et deux seuils (zone morte).

Ces deux fonctions sont respectivement définies par :

$$sat(s) = \begin{cases} -1 & ; si \quad s < -\epsilon \\ \frac{s}{\epsilon} & ; si \quad |s| < \epsilon \\ 1 & ; si \quad s > \epsilon \end{cases} \quad (III.19)$$

$$sat(s) = \begin{cases} 0 & ; si \quad |s| < \epsilon_1 \\ \frac{s - \epsilon_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} & ; si \quad \epsilon_1 < |s| < \epsilon_2 \\ sign(s) & ; si \quad s > -\epsilon_2 \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

On peut aussi la remplacer par une fonction de classe C1. On donne ci-dessous un exemple de ce type de fonction (Figure III.9)[31].

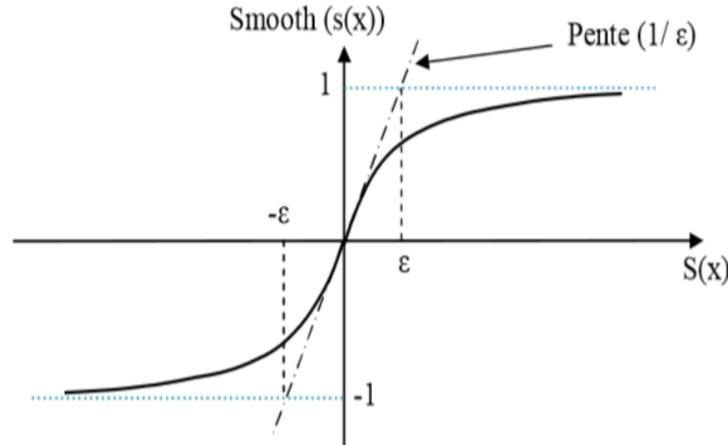


FIGURE III.9 – Fonction de classe C1 ($\epsilon > 0$ et petit)

$$smooth(S(x)) = tanh(S(x)) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{s(x)}{|s(x)| + \epsilon} \quad (\text{III.21})$$

D'où, on aura la commande douce suivante[18] :

$$\Delta U = k_x \frac{s(x)}{|s(x)| + \epsilon} \quad (\text{III.22})$$

III.6 Synthèse de la commande latérale par mode glissant

On utilisons le meme modèle que cel du PI

L'équation dynamique de l'erreur latérale au centre de gravité du véhicule, par rapport à une trajectoire de référence, est donnée par[7] :

$$\ddot{e} = a_y - a_{yref} = \dot{V}_y + rV - \frac{V^2}{R_c} \quad (\text{III.23})$$

La surface de Lyapunov augmentée est exprimée sous la forme :

$$S = \dot{e} + \lambda e \quad (\text{III.24})$$

Différentions cette dernière par rapport au temps :

$$\dot{S} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} \quad (\text{III.25})$$

Remplaçons (III.23) dans (III.25) :

$$\dot{S} = \dot{V}_y + rV - \frac{V^2}{R_c} + \lambda \dot{e} \quad (\text{III.26})$$

Remplaçons (II.10) dans (III.26) :

$$\dot{S} = -\frac{2(C_f + C_r)}{mV_x}V_y + \frac{2(C_rl_r - C_fl_f)}{mV_x}r - V_x r + \frac{2C_f}{mR_s}\delta_d + \frac{1}{m}F_w + rV_x - \frac{V^2}{R_c} + \lambda \dot{e} \quad (\text{III.27})$$

$$\dot{S} = -\frac{2(C_f + C_r)}{mV_x}V_y + \frac{2(C_rl_r - C_fl_f)}{mV_x}r + \frac{2C_f}{mR_s}\delta_d + \frac{1}{m}F_w - \frac{V^2}{R_c} + \lambda \dot{e} \quad (\text{III.28})$$

On a :

$$\ddot{\delta}_d = \frac{T_{sb}}{I_s}V_y + \frac{T_{sr}}{I_s}r - \frac{T_{sb1}}{R_s I_s}\delta_d - \frac{B_s}{I_s}\dot{\delta}_d + \frac{1}{I_s}(\Gamma_d + \Gamma_a) \quad (\text{III.29})$$

$$\ddot{\delta}_d = \frac{2K_m C_f \eta_t}{R_s V_x}V_y + \frac{2K_m C_f \eta_t l_f}{R_s V_x}r - \frac{2K_m C_f \eta_t}{R_s I_s}\delta_d - \frac{B_s}{I_s}\dot{\delta}_d + \frac{1}{I_s}(\Gamma_d + \Gamma_a) \quad (\text{III.30})$$

$$\frac{2K_m C_f \eta_t}{R_s I_s}\delta_d = \frac{2K_m C_f \eta_t}{R_s V_x}V_y + \frac{2K_m C_f \eta_t l_f}{R_s V_x}r - \ddot{\delta}_d - \frac{B_s}{I_s}\dot{\delta}_d + \frac{1}{I_s}(\Gamma_d + \Gamma_a) \quad (\text{III.31})$$

$$\frac{2K_m C_f \eta_t}{R_s^2}\delta_d = \frac{2K_m C_f \eta_t}{R_s V_x}V_y + \frac{2K_m C_f \eta_t l_f}{R_s V_x}r - I_s \ddot{\delta}_d - B_s \dot{\delta}_d + (\Gamma_d + \Gamma_a) \quad (\text{III.32})$$

$$\delta_d = \frac{R_s}{V_x}V_y + \frac{R_s l_f}{V_x}r - \frac{R_s^2 I_s}{2K_m C_f \eta_t}\ddot{\delta}_d - \frac{R_s^2 B_s}{2K_m C_f \eta_t}\dot{\delta}_d + \frac{R_s^2}{2K_m C_f \eta_t}(\Gamma_d + \Gamma_a) \quad (\text{III.33})$$

Substituons δ_d dans \dot{S}

$$\begin{aligned} \dot{S} = & -\frac{2(C_f + C_r)}{mV_x}V_y + \frac{2(C_rl_r - C_fl_f)}{mV_x}r + \frac{2C_f}{mR_s}\left(\frac{R_s}{V_x}V_y + \frac{R_sl_f}{V_x}r\right) \\ & - \frac{R_s^2 I_s}{2K_m C_f \eta_t} \ddot{\delta}_d - \frac{R_s^2 B_s}{2K_m C_f \eta_t} \dot{\delta}_d + \frac{R_s^2}{2K_m C_f \eta_t} (\Gamma_d + \Gamma_a) + \frac{1}{m} F_w - \frac{V^2}{R_c} + \lambda \dot{e} \end{aligned} \quad (\text{III.34})$$

On trouve :

$$\dot{S} = -\frac{2C_r}{mV_x}V_y + \frac{2C_rl_r}{mV_x}r - \frac{R_s B_s}{K_m \eta_t m} \dot{\delta}_d - \frac{R_s I_s}{K_m \eta_t m} \ddot{\delta}_d + \frac{R_s}{K_m \eta_t m} (\Gamma_d + \Gamma_a) + \frac{1}{m} F_w - \frac{V^2}{R_c} + \lambda \dot{e} \quad (\text{III.35})$$

En régime permanent $\dot{S} = 0$.

D'où la commande $(\Gamma_d + \Gamma_a)_{eq}$ est tirée comme suite :

$$(\Gamma_d + \Gamma_a)_{eq} = \frac{2C_r K_m \eta_t}{R_s V_x} V_y - \frac{2C_r l_r K_m \eta_t}{R_s V_x} r + B_s \dot{\delta}_d + l_s \ddot{\delta}_d + \frac{V^2 K_m \eta_t m}{R_c R_s} - \frac{k_m \eta_t}{R_s} F_w + \frac{\lambda K_m \eta_t m}{R_s} \dot{e} \quad (\text{III.36})$$

Avec :

Durant le mode de convergence : $S\dot{S} < 0$

$$(\Gamma_d + \Gamma_a)_n = K \text{sign}(S) \quad (\text{III.37})$$

Où K : réel positif.

L'emploi d'une surface augmentée dans ce cas entraîne une augmentation de la fréquence de commutation de la commande d'où la diminution de oscillations (le problème de réticence)[7].

Par conséquent, le couple total représentant l'entrée de commande du système est défini comme suit :

$$(\Gamma_d + \Gamma_a) = (\Gamma_d + \Gamma_a)_{eq} + (\Gamma_d + \Gamma_a)_n \quad (\text{III.38})$$

III.7 Résultat de simulation

Les tests sont effectués sous les mêmes conditions de simulation des tests précédents ($\Gamma_d=0$). On remplace le régulateur de type PI, par le régulateur mode glissant qui sera adopté pour les tests qui suivent (le gain du régulateur k a été déterminé en utilisant la méthode essai-erreur).

a- Test de suivi de trajectoire

Le but de ce test, est de vérifier la robustesse du régulateur mode glissant pendant une conduite normale avec paramètres connus comme celles des paramètres du véhicule lors la synthèse d'un régulateur PI.

Sur la figure (III.10), on présente la trajectoire de référence et la trajectoire du véhicule parcourue.

On remarque que le véhicule suit bien sa trajectoire de référence, aussi l'angle des roues se varie selon la trajectoire du véhicule parcourue. Sur la même figure, on présente le couple volant qui est une entrée de commande pour le système, il varie entre ± 12 Nm et il est oscillant à cause de sa nature non linéaire.

Les autres réponses ont les mêmes allures que celles de PI mais présentent des oscillations qui sont due à la partie discrète de la commande mode glissant.

b- Test de robustesse à une vitesse élevée

On remarque d'après la figure (III.11) que malgré le fonctionnement à une vitesse élevée, le modèle contrôlé n'est pas influencé. Ce qui exprime la robustesse du régulateur implanté. Cependant, cela nécessite un couple volant plus important pour atteindre la trajectoire de référence imposée.

Les autres réponses pris les mêmes allures comme celles de test précédent mais avec des amplitudes importantes.

c- Test de robustesse par rapport au changement de rayon de courbure

On remarque d'après la figure (III.12) qu'il y a une meilleure poursuite de trajectoire malgré le changement du rayon. Un rayon de courbure important nécessite couple de commande assez petit. Aussi ce changement affecte les autres réponses qui ont pris les mêmes allures que celles des tests précédents mais avec des amplitudes réduites.

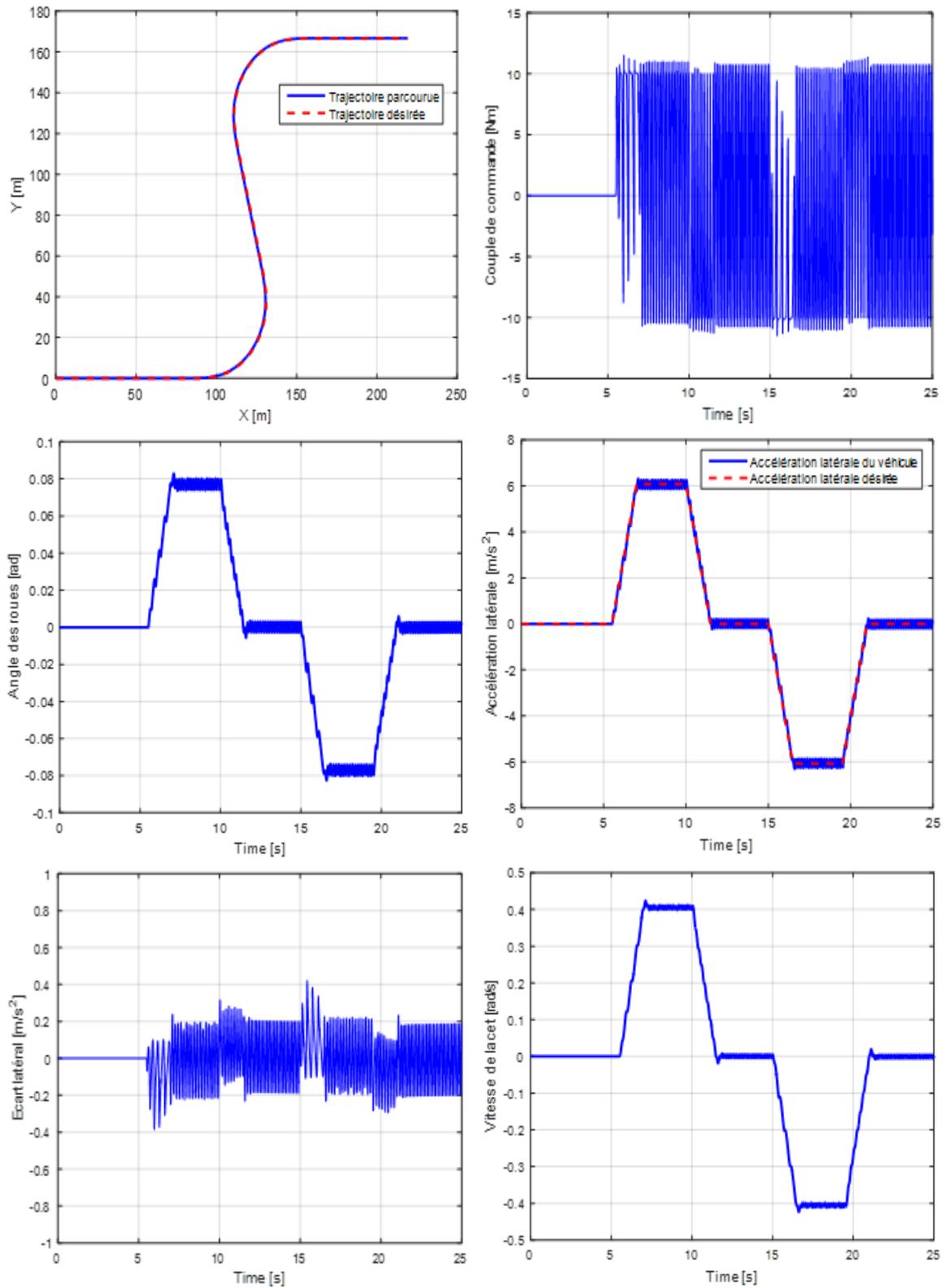


FIGURE III.10 – Test de suivi de trajectoire

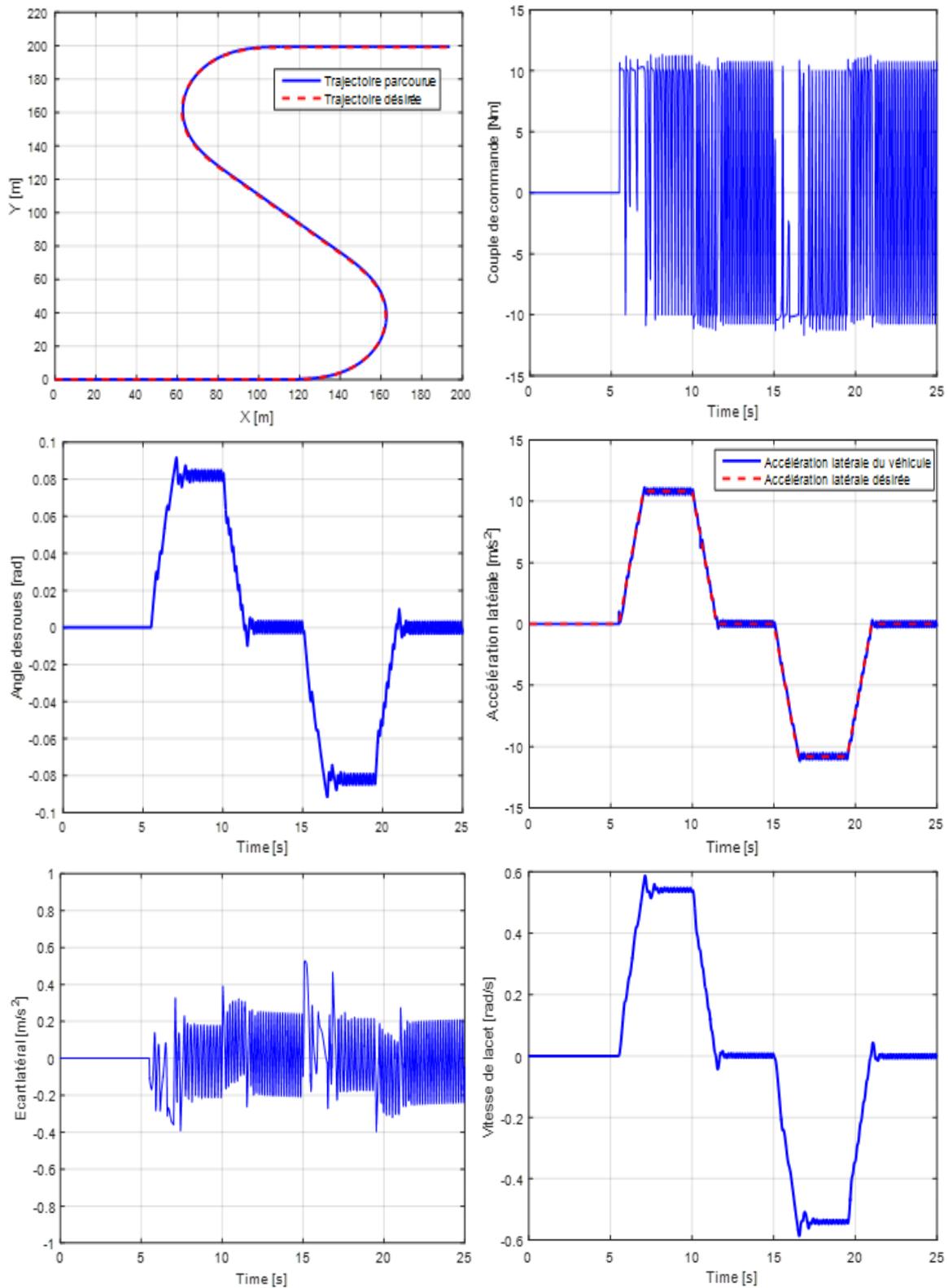


FIGURE III.11 – Test de robustesse à une vitesse élevée

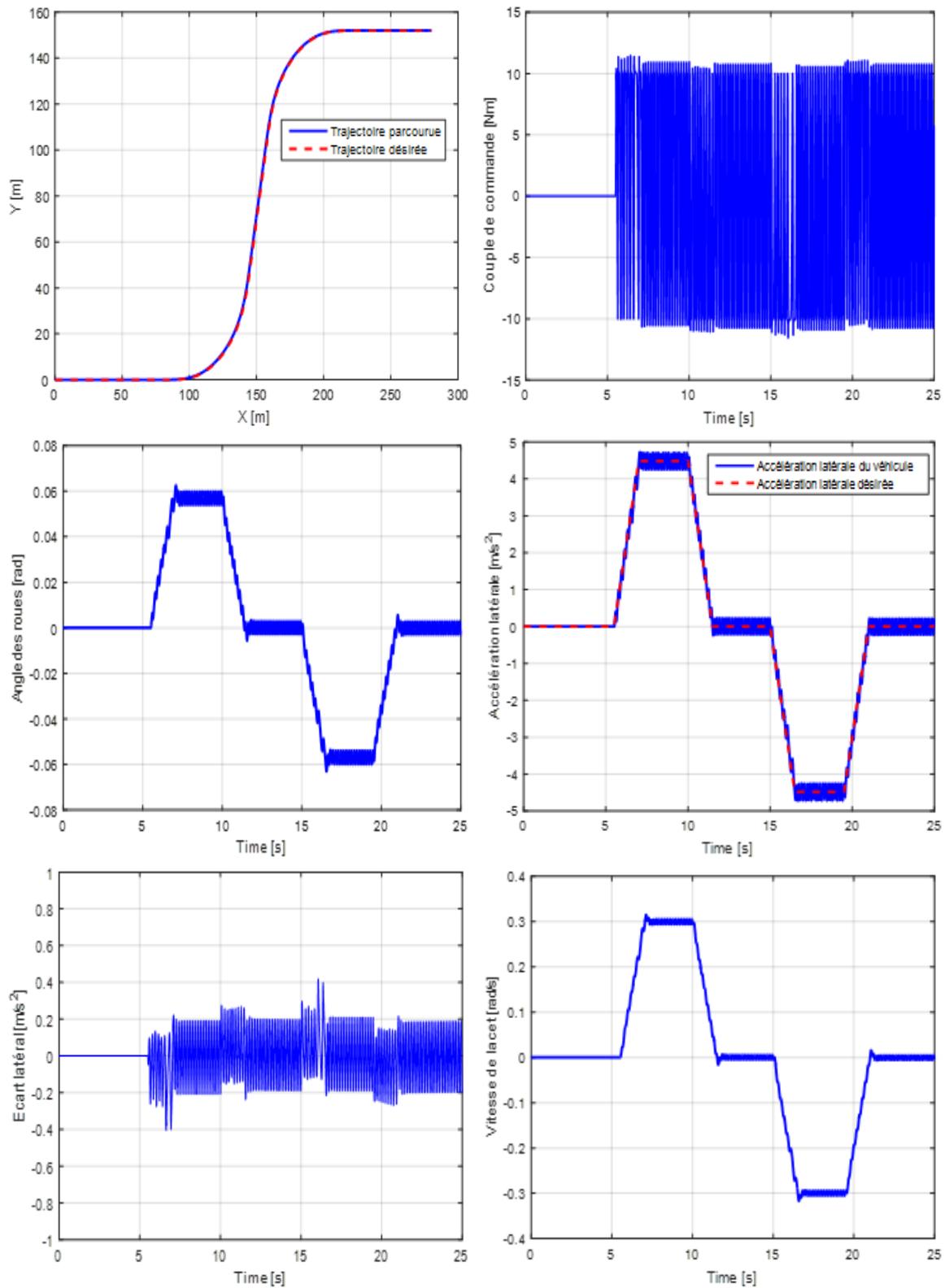


FIGURE III.12 – Test de robustesse par rapport au changement de rayon de courbure

d- Test de robustesse par rapport aux incertitudes paramétriques du véhicule**1- Incertitude sur le coefficient de rigidité du pneu**

On remarque d'après la figure (III.13) que la trajectoire et les autres réponses ne sont pas influencées par l'introduction des incertitudes sur les rigidités des pneus (variation à 25%) ce qui confirme l'insensibilité du régulateur mode glissant synthétisé par rapport au changement paramétrique.

Aussi, l'incertitude sur ce paramètre nécessite un couple de commande important.

2- Incertitudes sur la masse totale du véhicule

On remarque sur la figure (III.14) que le véhicule suit parfaitement sa trajectoire. Aucun changement considérable sur les autres réponses. Cependant la réponse en couple est complètement changée.

e- Test en présence d'une perturbation extérieure

Sur la figure (III.15), On remarque que le véhicule suit bien sa trajectoire de référence. Aussi aucun changement aperçu sur les autres réponses durant l'application du coup de vent, ce qui signifie que le régulateur mode glissant est insensible aux perturbations extérieures.

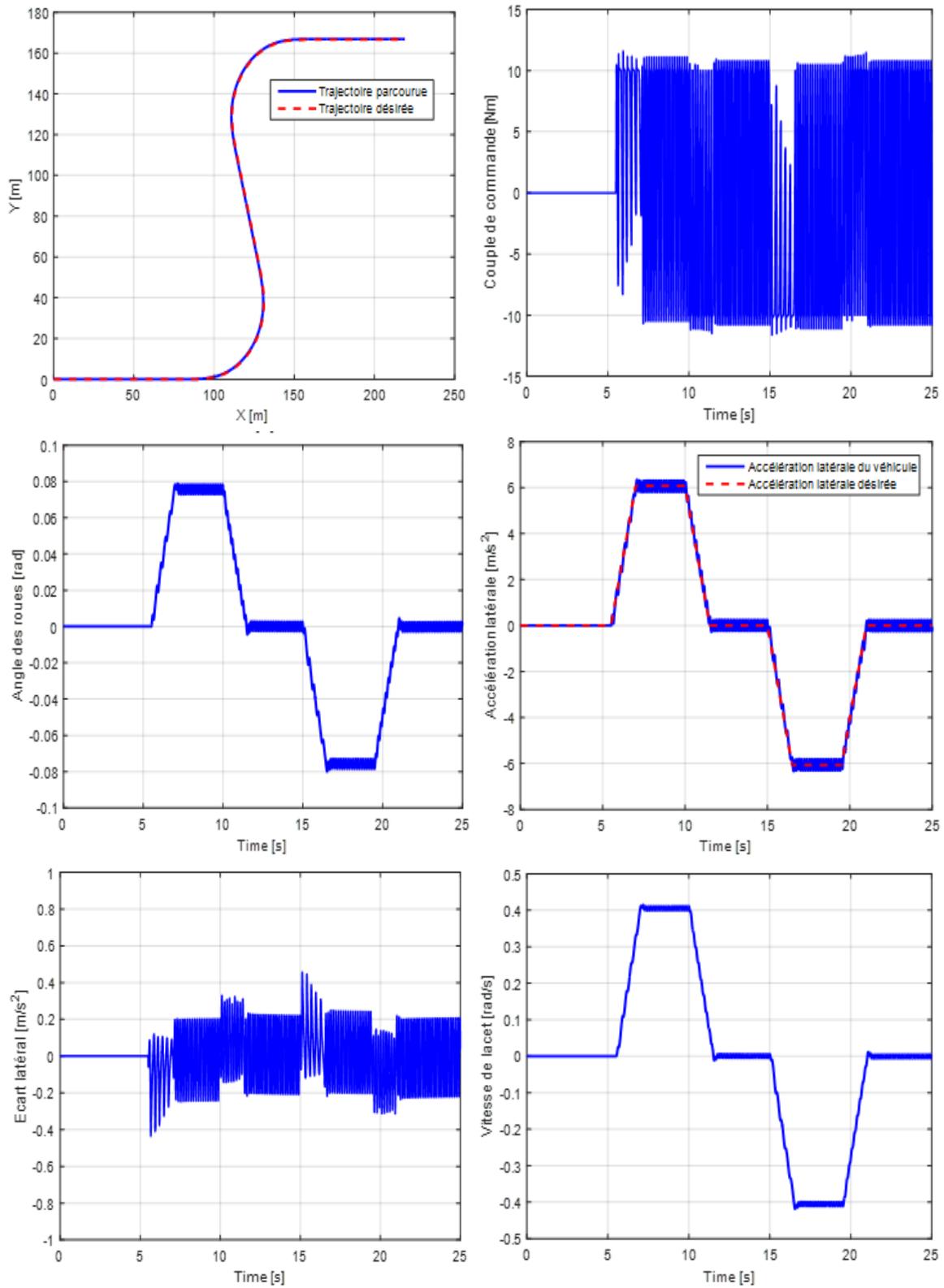


FIGURE III.13 – Incertitude sur le coefficient de rigidité du pneu

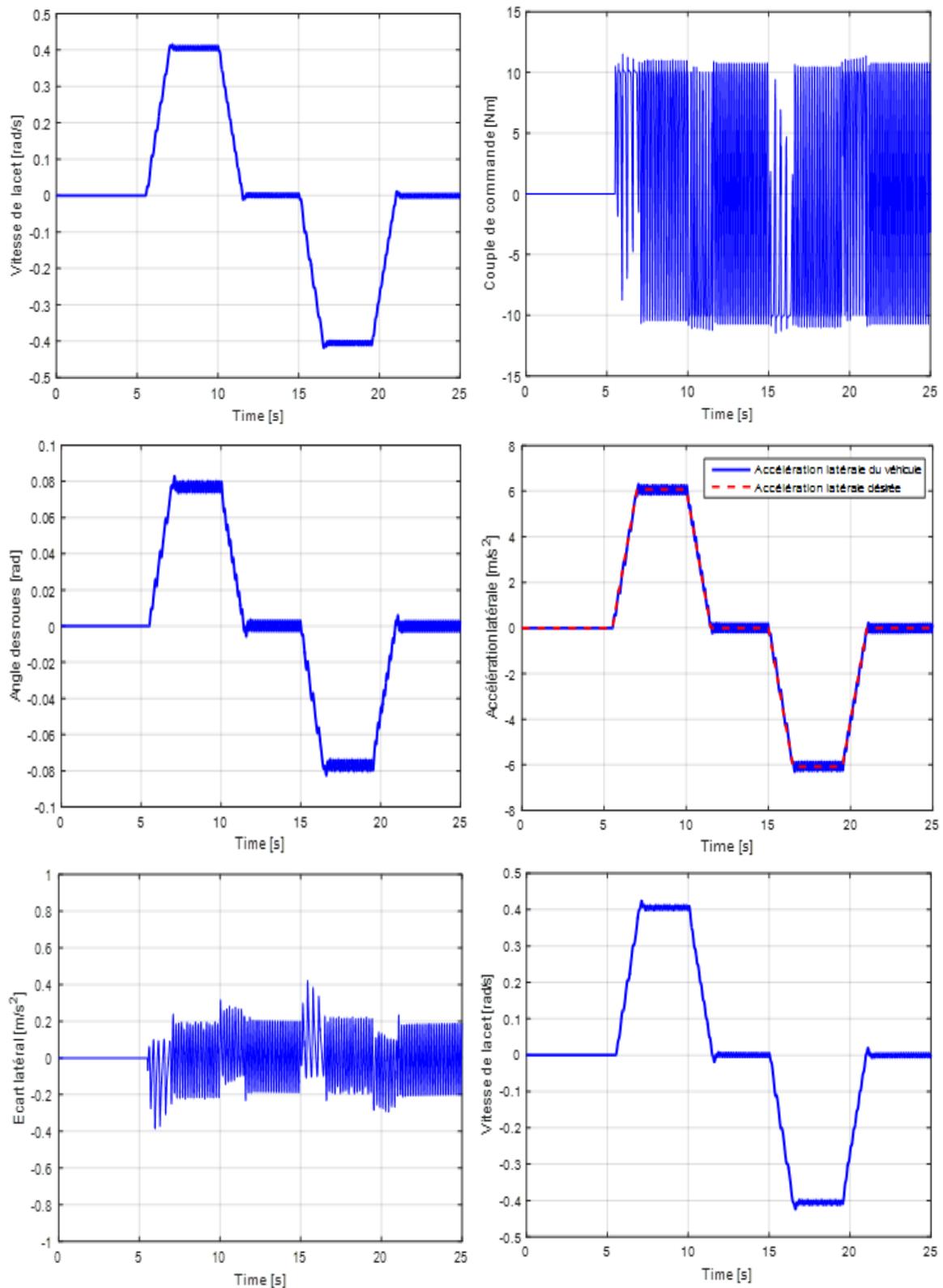


FIGURE III.14 – Incertitudes sur la masse totale du véhicule

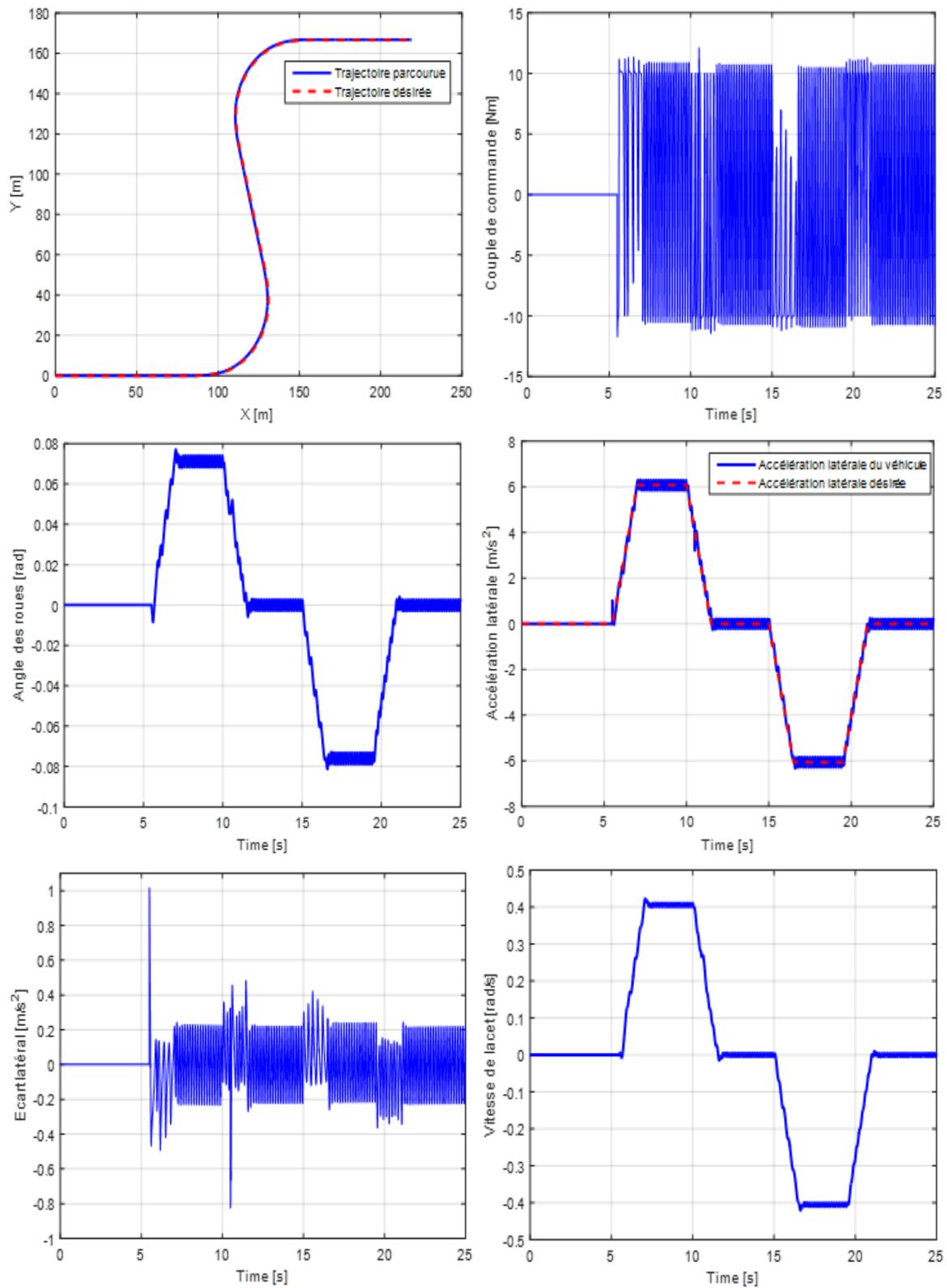


FIGURE III.15 – Test en présence d’une perturbation extérieur

III.8 Conclusion

Dans cette partie, une technique de commande des systèmes non linéaires a été présentée. Les résultats de simulation des différents tests ont montré que la commande mode glissant est robuste et assure une très bonne poursuite de trajectoire.

La discontinuité de la commande mode glissant peut dégrader les performances et conduit à une instabilité.

Enfin, nous pouvons conclure que l'utilisation de la commande mode glissant est la solution la plus souhaitable pour l'asservissement en vitesse du VE car elle assure de bonnes performances (précision et rapidité) meilleures que celles d'un PI classique avec une stabilité du système garantie. Cependant, la nature de commande discontinue dans le régulateur mode glissant génère des oscillations indésirables qui peuvent dégrader le fonctionnement des actionneurs et provoquer un dysfonctionnement ce qui limite son utilisation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce mémoire, le travail proposé présente des stratégies de commande linéaire et non linéaire pour le contrôle latéral d'un véhicule électrique. Tout au long de ce mémoire, l'accent est porté sur le choix et l'étude de méthodologie de contrôle, son application et la validation de la loi de commande robuste adoptée.

Nous avons tout d'abord consacré la première partie à la l'étude et à la présentation des véhicules électrique en discutant des différentes architectures, des divers constituants qui font partie de la chaine de traction Par la suite, nous avons présentés un modèle à trois degré de libertés, traduisant la dynamique du véhicule : l'évolution du déplacement longitudinale, du déplacement latéral et le lacet du véhicule.

Nous avons passé après au contrôle latéral par un régulateur linéaire PI en adoptant le modèle latéral du véhicule et en lui imposant à suivre une trajectoire de référence.

Les résultats de simulation ont illustré que le régulateur synthétisé a donné de bonnes performances et assure un bon suivi de trajectoire. Mais suite aux tests de robustesse, il apparait que ce réglage classique PI est sensible aux variations paramétriques du système et aux perturbations extérieurs.

Pour remédier à ce problème, nous avons fait appel dans la troisième partie à une lois de commandes non linéaires insensible et robuste face aux perturbations et aux incertitudes sur les paramètres du modèle ; c'est également la commande par mode glissant adoptée pour la commande de la dynamique latérale du véhicule.

Les résultats de simulation de la commande par mode glissant ont montré que ce type commandes est robuste et assure une très bonne poursuite de trajectoire. Par contre, la structure de la loi de commande de cette stratégie peut provoquer un dysfonctionnement et limite son utilisation.

Les travaux futurs peuvent se pencher sur l'amélioration commande par mode glissant en utilisant des algorithmes de commande mode glissant d'ordre supérieur tel que le Super-twisting.

Aussi, d'autre stratégies de commandes non linières peuvent être utilisées en assurant les mêmes performances du celles de mode glissant tout en conservant la stabilité du système.

ANNEXE

Paramètres du VE

l_f	1.127 m
l_r	1.485 m
M	1476 kg
J	1810 kg.m ²
μ	0.8
C_{l_f}	37407 N/rad
C_{l_r}	51918 N/rad
C_f	52000 N/rad
C_r	45600 N/rad
V_x	15 m/s
η_t	0.185 m
k_m	0.038
R_s	16
B_s	5.73
I_s	0.05 kg.m ²
l_s	5 m
l_w	0.4 m

Bibliographie

Bibliographie

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Honda_e.
- [2] <https://minute-auto.fr/guide/mecanique/les-systemes-de-suspension-d-une-voiture>.
- [3] <https://www.interventionprevention.com/la-securite-des-voitures-electriques/>.
- [4] *Tesla(automobile)*.
- [5] BOUCHA ABDELLAH. Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dspace embarqué. Master's thesis, school, 2003.
- [6] Mohamed BELKACEM. Contrôleurs non linéaires adaptatifs pour une suspension active d'un véhicule. Master's thesis, Université des Sciences et de Technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf.
- [7] Hassan BENARIBA. *Contribution à la commande d'un véhicule électrique*. PhD thesis, 2018.
- [8] Djamel BENOUDJIT. Contribution a l'optimisation et a la commande d'un systeme de propulsion pour vehicule electrique. Master's thesis, 2005.
- [9] CHAOUCHI RABAH BOUGHANEM SAMIR. Commande en vitesse d'un véhicule électrique. Master's thesis, Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou, 2018.
- [10] S Butterbach. *Stockage d'énergie électrique par association de batteries au plomb et de supercondensateurs pour véhicule lourd*. PhD thesis, PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, National Number of These . . . , 2012.
- [11] Nassim BOUTEMEUR Said CHABA. Méthode basée sur le dépassement de la réponse indicielle pour le réglage des contrôleurs pid. Master's thesis, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2017.
- [12] Xavier Claeys. *Commande latérale des véhicules automobiles avec prise en compte de la dynamique des actionneurs. application a la conduite en peloton des poids lourds*. PhD thesis, 2002.
- [13] Abdeljalil Daanoune. *Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides*. PhD thesis, 2012.
- [14] D.Sury. La voiture électrique : révolution ou fausse bonne idée. Master's thesis, Université Libre de Bruxelles,, 2011.
- [15] Nicoleta Minoiu Enache. Assistance préventive à la sortie de voie. Master's thesis, Université d'Evry-Val-d'Essonne.
- [16] Nicoleta Minoiu Enache. *Assistance préventive à la sortie de voie*. PhD thesis, 2008.

- [17] Christophe Espanet. *Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inversée-Application au moteur-roue*. PhD thesis, 1999.
- [18] Merzougui Benyamina. Hamian fadila. Contrôle latérale d'un véhicule avec la technique hybride mode glissant/backstepping. Master's thesis, Université Dr tahar Moulay de Saida, 2016.
- [19] HENNI GHARBI. *Modélisation et Commande d'un véhicule électrique hybride*. PhD thesis, Boucherit Med Sghir, 2015.
- [20] Ali Charara Gilles Tagne, Reine Talj. Contrôle latéral d'un véhicule autonome par mode glissant du second ordre. Master's thesis, Université de Technologie de Compiègne - CNRS, Centre de Recherches de Royallieu, BP 20529 60205 Compiègne cedex, France., 2013.
- [21] MARIF Ismail ABDAT Hichem. La commande en vitesse d'un véhicule électrique. Master's thesis, Université de Tlemcen.
- [22] Deghboudj Imen. Commande des systèmes non linéaires par mode glissant d'ordre supérieur. Master's thesis, UNIVERSITE CONSTANTINE 1, 2013.
- [23] HOUACINE Karima. Commande neuro-floue d'une machine asynchrone dans une chaîne de propulsion d'un véhicule Électrique. Master's thesis, UNIVERSITÉ MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2016.
- [24] Walid Lajnef. *Modélisation des supercondensateurs et évaluation de leur vieillissement en cyclage actif à forts niveaux de courant pour des applications véhicules électriques et hybrides*. PhD thesis, 2006.
- [25] KHARROUBI Larbi. Éléments de régulation numérique. Master's thesis, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB).
- [26] Salim Maakaroun. *Modélisation et simulation dynamique d'un véhicule urbain innovant en utilisant le formalisme de la robotique*. PhD thesis, 2011.
- [27] BOURENANE ANIS MEZIANI SIF EDDINE. Contrôle par logique floue d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique basé sur une machine asynchrone à double alimentation. Master's thesis, Université Abderrahmane Mira, 2013.
- [28] BENYAMINA Mokhtar. Observateurs pour l'estimation des états dynamique d'un véhicule. Master's thesis, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORANMOHAMED BOUDIAF, 2014.
- [29] Aiman Nouh. *Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers*. PhD thesis, Besançon, 2008.
- [30] Guessouri Noureddine. Étude comparative entre influence des différents paramètres physiques et la performance du véhicule électrique modélisation et simulation. Master's thesis, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.
- [31] TITRAOUI Radhwane. Commande par mode glissant d'un appareil à vol et atterrissage vertical. Master's thesis, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016.
- [32] Thibaut Raharijaoana. *Commande robuste pour l'assistance au contrôle latéral d'un véhicule routier*. PhD thesis, 2004.

-
- [33] Louay Saleh. *Contrôle latéral partagé d'un véhicule automobile*. PhD thesis, 2012.
- [34] Damien Sammier. *Sur la modélisation et la commande de suspension de véhicules automobiles*. PhD thesis, 2001.
- [35] FIZI SOFIANE. *Commande adaptative floue des systèmes non linéaires de convergence en temps fini*. Master's thesis, UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF1, 2013.
- [36] Gwenaëlle Souffran. *Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission*. PhD thesis, 2012.
- [37] Tahenni Yacine and Boudjemil Hacene. *Commande en vitesse d'un véhicule électrique par mode glissant*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2018.
- [38] Zedjiga Yacine. *Observateurs pour l'estimation de la dynamique Latérale du véhicule et application de la détection de Situations Critiques*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [39] Y.Zouaoui. *Commande par mode glissant des courants statoriques de la machine asynchrone*. Master's thesis, Université de Sétif, 2010.
- [40] Sabrina Zaouzaou, Sabrina Meziani Sabrina, A Charikh, et al. *Etude et simulation des convertisseurs statiques existant dans un véhicule électrique*. PhD thesis, Université Abderrahmane Mira, 2017.